

**Ein Beitrag zur Objektivierung des Sicherheitsempfindens mit Fahrermodellen bei
Lenkstörungen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Marcus Fritzsche

aus

Werdau

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schramm
Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Plöchl
Tag der mündlichen Prüfung: 29.02.2016

Für meine Eltern Birgit und Mathias.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand der Abteilung *Entwicklung Lenkungs elektronik der Volkswagen AG* in Braunschweig und in Zusammenarbeit mit dem *Lehrstuhl für Mechatronik* der Universität Duisburg-Essen.

Für die hilfreiche Unterstützung bei der Erstellung meiner Doktorarbeit richtet sich mein Dank vor allem an meinen Doktorvater Prof. Schramm. Ich möchte behaupten, dass er zu den Menschen gehört, von denen ich in vielerlei Hinsicht am meisten gelernt habe.

Der wichtigste Begleiter und Ratgeber für mich war Dr. Christoph Schmidt. Mit seiner Hilfe konnte ich die richtige akademisch-wirtschaftliche Balance finden, die eine Industriepromotion mit sich bringt. Ihm gilt mein ganz besonderer Dank.

Carsten Busse hat die Forschungsarbeit fortwährend unterstützt und gefördert, dafür möchte ich mich hiermit vielmals bei ihm bedanken.

Ein herzliches Dankeschön richte ich an meine Arbeitskollegen, Mitdoktoranden, Freunde und Familie, die mit ihren wertvollen Puzzlestücken diese Arbeit bereichert haben.

Braunschweig, im März 2016

Marcus Fritzsche

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

The results, opinions or conclusions of this dissertation are not necessarily those of the Volkswagen AG.

Summary

The high safety requirements for electromechanical steering system demand a precise knowledge of dangerous evaluated steering moments that can lead to safety critical situations. Especially the development of sophisticated steering functions requires software monitoring of EPS motor moment. Since in test scenario of V-model of ISO26262 not all the combinations of system inputs can be tested, there is a monitoring level in the ECU of the EPS which saturates the steering moment when it exceeds the defined limit. These limits were determined by effortful proband tests. In the framework of the present work an elaborated proband test in real vehicle and on driving simulator was carried out in order to identify the objective criteria for the feeling of security. Based on this a new systematic method for generation of objective parameters was introduced. With the help of these objective parameters the feeling of security could be calculated in already conducted proband tests. However, this process depends on the driver who compensates the occurring disturbances in the vehicle, furthermore a driver model class was developed which can simulate the human steering angle control during these short occurring disturbances. These driver model classes consist of different types of driver models which were identified based on proband tests. Furthermore, a method for fusion of these models with well-known driver models was introduced to carry out driving maneuvers in the absence of occurring disturbances.

With that the basis for a wide application area is created to predict critical assessments in virtual driving tests with driver models.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Lenkgefühl	1
1.1.1	Der Mensch als Regler	2
1.1.2	Definition per Objektivierung	2
1.2	Abstraktionsschichten der Objektivierung	3
1.3	Ziel der Arbeit	4
2	Stand der Technik	7
2.1	Aufbau und Funktion der EPS	7
2.1.1	Aufbau	7
2.1.2	Modellgleichungen	10
2.1.3	Sicherheitskonzept	13
2.1.4	Lenkfunktionen	15
2.2	Wahrnehmung lateraler Fahrzeugführung	18
2.3	Objektivierung von Lenkgefühl	21
2.3.1	Subjektive Bewertung des Fahrverhaltens	21
2.3.2	Objektive Kenngrößen des Fahrverhaltens	24
2.3.3	Klassische Lenkgefühl-Objektivierung	26
2.3.4	Fahrermodellbasierte Objektivierung	27
2.3.5	Objektivierung von Störgrößen	29
2.4	Modellierung des Fahrers	32
2.5	Fahrsimulatoren	37
2.6	Zusammenfassung	38
3	HiL-Lenkungsprüfstand	39
3.1	Simulationsmodell	39
3.2	EPS-Fahrsimulator mit realem Fahrer	43
3.3	EPS-Fahrsimulator mit virtuellem Fahrer	45
3.4	Validierung	45
4	Die Probandenversuche	47
4.1	Das Versuchsfahrzeug	47
4.2	Probanden	48
4.3	Fahrmanöver	48
4.4	Störaufschaltungen	50
4.5	Durchführung	51

4.6	Fahrsimulator	53
4.7	Kennzahlen	54
4.8	Vergleich Fahrsimulator und Fahrzeug	54
5	Objektivierung der Kritikalität	57
5.1	Kennwert-Identifikation	57
5.1.1	Heuristische Kennwertsuche	57
5.1.2	Kennwerte mittels einer Vektorraumnorm	60
5.2	Vorhersage der Bewertungen	64
5.2.1	Regression der Kreisfahrten	65
5.2.2	Regression des Gesamtdatenpools	65
5.3	Zusammenfassung	69
6	Das Fahrermodell	71
6.1	Systemidentifizierung	71
6.1.1	Lineare Zustandsraummodelle	73
6.1.2	Identifizierung von 30 Fahrermodellen	73
6.2	Hybridisierung des Fahrermodells	79
6.2.1	Systemidentifizierung mit Vorausschauwinkeln	81
6.2.2	Fusion von Fahrermodellen	81
6.3	Zusammenfassung	84
7	Zusammenfassung	87
7.1	Zusammenfassung	87
7.2	Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit	87
7.3	Ausblick	89
	Abbildungsverzeichnis	91
	Tabellenverzeichnis	95
	Abkürzungsverzeichnis	97
A	Fragebogen	99
B	Fahrmanöver	101
C	Versuchsablauf	103
	Literaturverzeichnis	105

1 Einleitung

Elektromechanische Lenksysteme (Electrical Power Steering, EPS) wurden um das Jahr 2000 in die Großserienfertigung eingeführt, dennoch ist die Evolution dieses Systembauteils noch in vollem Gange. Entwicklungsherausforderung bleibt die feinfühlig subjektive Abstimmung des Systems und weiterführend das virtuelle Design des Lenkgefühls. Die Rahmenbedingungen für dieses Design werden von der sicheren Beherrschung des Fahrzeugs bei Lenkeingriff vorgegeben. Die hohen Sicherheitsstandards der EPS haben dazu geführt, dass die Lenkungssoftware von Sicherheitsfunktionen überwacht wird. Diese Überwachung lässt den eigentlichen Lenkfunktionen innerhalb gewisser Grenzen freien Lauf, beschränkt aber das Motormoment, sobald definierte Werte überschritten werden. Einerseits wird dem Lenkfunktionsentwickler damit eine Bandbreite eingeräumt, innerhalb der sich die Funktionen beliebig verhalten dürfen und das Lenkgefühl in verschiedenen Ausprägungen implementiert werden kann. Andererseits wird bei Verlassen dieser Grenzen das Motormoment angepasst, so dass das Lenksystem beherrschbar bleibt.

Um die Grenzen von Beherrschbarkeit zu definieren, werden gegenwärtig regelmäßig aufwändige Probandentests durchgeführt. Dabei werden bei verschiedenen Störgrößenaufschaltungen die Kritikalitätsbewertungen der Probanden abgefragt, um daraus die Sicherheitsgrenzen für jeden Fahrzeug- und Lenkungstyp zu definieren und an eine große Fahrerpopulation anzupassen.

In dieser Arbeit wird ein Werkzeug vorgestellt, um Kritikalitätsbewertungen in einem virtuellen Versuch zu generieren. Diese Toolkette besteht aus einem Fahrermodell, mit welchem die Fahrversuche virtuell durchgeführt werden und einer Regressionsanalyse, um aus den resultierenden Fahrzeugreaktionsgrößen die Kritikalitätsbewertungen vorherzusagen.

1.1 Lenkgefühl

Eine klassische Definition des Begriffs Lenkgefühl findet sich im Lenkungshandbuch [Pfeffer und Harrer \[2011\]](#): „Das Lenkgefühl ist das subjektive Empfinden des Fahrers beim Lenken eines Fahrzeugs. Dieses Lenkgefühl resultiert aus der Empfindung und der Beurteilung des Fahrers vom Lenkverhalten bzw. des Fahrverhaltens des Fahrzeugs, es entsteht aus der Interaktion Fahrer-Fahrzeug. Als Fahrverhalten bezeichnet man allgemein die Reaktion des Fahrzeugs auf

Fahrereingaben und auf Störungen wie beispielsweise Seitenwind oder Straßenunebenheiten. Das Lenkverhalten ist ein Teilbereich des Fahrverhaltens und beschreibt die Reaktion des Fahrzeugs auf Lenkeingaben und Störungen.“

Durch die EPS, also die Kombination aus Mechanik, Elektromagnetismus und Software, ist im Allgemeinen im Fahrzeug ein weitgehend beliebiges Lenkgefühl erzeugbar, insofern die Kombination aus Mechanik, Hardware und Software entsprechend abgestimmt ist. Zum Lenkgefühl zählt aber auch die Auswirkung von Systemstörungen wie zum Beispiel Zusatzmomente, die im EPS-Motor neben der Unterstützungsleistung generiert werden. Das subjektive Empfinden, welches sich beim Ausregeln einer Störgröße einstellt, wird über eine Kritikalitätsbewertung erfasst.

Im Folgenden werden weitere Sichtweisen und Definitionen auf das Lenkgefühl dargestellt, insbesondere wird eine Definition vorgeschlagen, die formal induziert ist und Objektivierung als quantitativen Zugang zum Lenkgefühl verwendet.

1.1.1 Der Mensch als Regler

Der Mensch hat als Regler insbesondere die Aufgabe, das Fahrzeug entlang einer Spur zu führen. Dazu steuert der Mensch das Fahrzeug vom Startpunkt zum Endpunkt und regelt während der Fahrt die Fahrzeugführung. Dazu können verschiedene Ebenen betrachtet werden, auf denen der Mensch als Regler wirkt. Das Lenkgefühl im engeren Sinne nach [Wolf \[2009\]](#) ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Darin wird die geläufige Konvention verwendet, dass Ortsgrößen im Uhrzeigersinn den Regelkreis durchlaufen und Kraft- sowie Momentgrößen gegen den Uhrzeigersinn laufen. Notwendige Nebenbedingung dieser Konvention ist, dass Fahrer, Fahrzeug und Umwelt als Blöcke im Uhrzeigersinn dargestellt sind. Das Lenkgefühl im engeren Sinne bezieht sich hier also auf die Lenkwinkel- und Lenkmomentinteraktion des Fahrers mit dem Fahrzeug, bei Ausblendung aller anderen Sinneskanäle. Dieses Lenkgefühl ist am besten mit verbundenen Augen und Ohren an einem geeigneten statischen Prüfstand untersuchbar. In Kapitel 3 wird ein Prüfstand vorgestellt, der im besonderen Maße für die Untersuchung des Lenkgefühls im engeren Sinne geeignet ist.

1.1.2 Definition per Objektivierung

Der Begriff „Lenkgefühl“ ist von seiner Natur aus nicht exakt definierbar, weil er subjektive Wahrnehmungen beschreibt. Eine elegante Lösung, das Lenkgefühl zu definieren, ist die Definition per Objektivierung: Ist eine Abbildungsvorschrift zu finden, die verschiedenartig parametrisierte Systeme - hier sind es

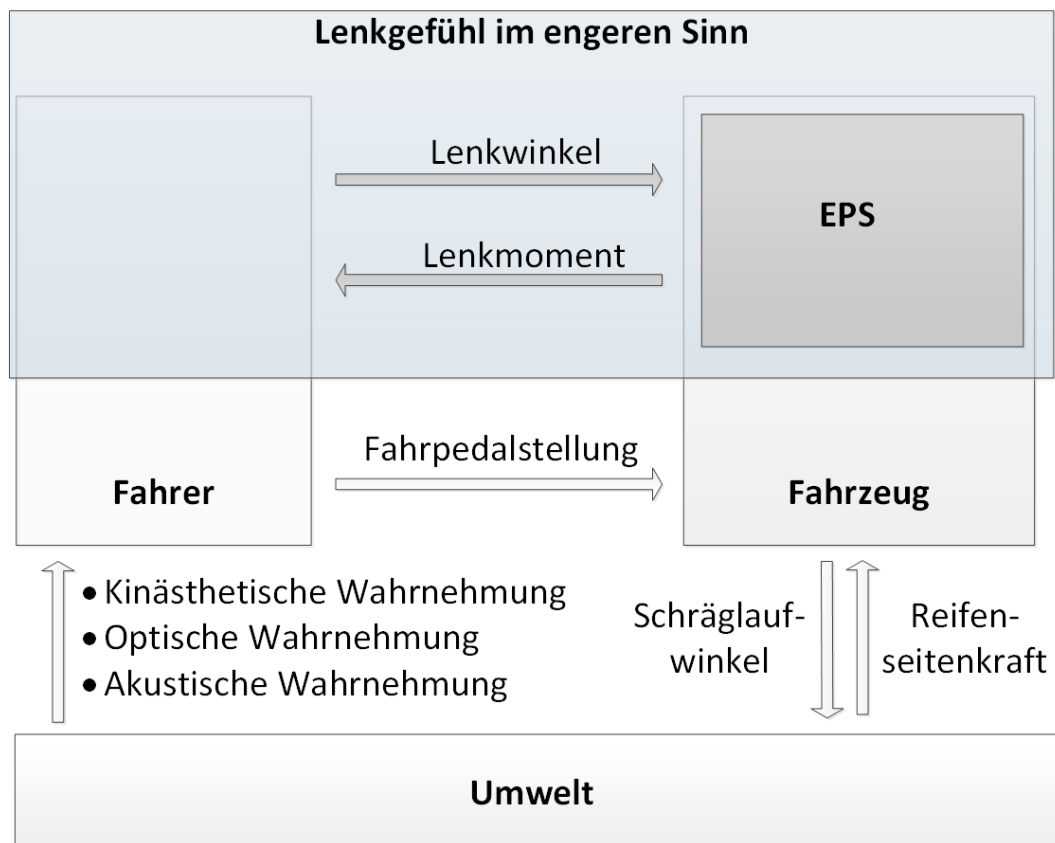


Abbildung 1.1: Regelkreis Fahrzeugführung und Lenkgefühl im engeren Sinn

EPS-Varianten und deren Expertenurteile - mit hoher Korrelation vorhersagt, kann diese Abbildung als Lenkgefühl definiert werden. Je granulierter diese Abbildung Subjektivbewertungen vorhersagen kann, desto präziser ist die Definition des Lenkgefühls im jeweiligen Stand der Technik.

1.2 Abstraktionsschichten der Objektivierung

Um die vielfältigen Möglichkeiten der Objektivierung des Lenkgefühls aufzuzeigen und systematisch zu gliedern, werden in diesem Kapitel Abstraktionsebenen von der Realfahrt zur Simulation gezeigt. Ziel ist es, das Lenkgefühl im erweiterten Sinne prädiktiv zu erfassen. Das eine Extrem ist dabei die Fahrt im realen Fahrzeug mit einem realen Fahrer, das andere Extrem ist die vollständige Simulation mit Prädiktion der Subjektiv-Bewertungen. Ein stetiger Übergang zwischen diesen Extremen kann durch die folgenden Zwischenschritte erfolgen.

Der Fahrer fährt in einem realen Fahrzeug, wobei definierte Sinneskanäle simuliert sind. Zum Beispiel kann der visuelle Sinneskanal durch eine Videobrille

simuliert werden, welche der Fahrer aufsetzt, wodurch er visuell vollständig von der Umwelt entkoppelt ist. Dadurch ist es unter anderem möglich, den Zusammenhang zwischen dem kinästhetisch und visuell wahrgenommenen Wankwinkel zu manipulieren und damit die menschliche Fusion dieser Sinneskanäle zu untersuchen. Des Weiteren kann das parallel zur Realfahrt mitlaufende Simulationsmodell vom Fahrer subjektiv auf Authentizität bewertet werden, um Minimalanforderungen an die Leistungsfähigkeit der Simulation, in Bezug auf Objektivierung, zu definieren. Gleiches gilt für die akustische Simulation, indem der Fahrer schallisolierte aktive Kopfhörer trägt, mit denen gleichzeitig ein Simulationsgeräusch überlagert werden kann. Die Geräusche beim Fahren sind im Allgemeinen nicht zu unterschätzen, weil der Fahrer insbesondere die Reifengeräusche wahrnehmen kann, die ihn bei der Querführung unterstützen, indem sie ihm wichtige Informationen über die Haftgrenze liefern.

Darüber hinaus kann das Lenkgefühl im engeren Sinne durch einen Lenkmomentsteller im Fahrzeug manipuliert werden, was einer Steer-by-Wire Lenkung entsprechen würde. Untersuchungen für diesen Spezialfall finden sich in [Koch \[2010\]](#) und [Dettki \[2005\]](#). Werden die Sinneskanäle nun schrittweise durch Simulation substituiert, ergibt sich eine stetige Abfolge, um die Fusion der einzelnen Sinneskanäle im Menschen zu untersuchen.

Umgekehrt kann der Mensch nicht schrittweise durch Simulation eines Fahrermodells substituiert werden. Die Lenkradstellung entsteht aus Sensordatenfusion des Menschen. Diese sensorischen Kanäle sind offensichtlich nicht isoliert untersuchbar, das ist unter dem Begriff Emergenz bekannt. Zum Beispiel zeigt das die folgende Betrachtung von Lenkgefühl im engeren Sinne, indem auf Visualisierung, Kinästhetik und Akustik verzichtet wird und nur das Lenkmoment sowie der Lenkwinkel über die Gliedmaßen wahrgenommen werden. Das reine Lenkmoment ist ohne Winkeländerung nicht wahrnehmbar, weil die Kraftwahrnehmung in der Hand über Wegänderung wahrgenommen wird, [Wolf \[2009\]](#). Das bedeutet: Es ist keine sinnvolle Trennung im Kleinwinkelbereich mehr möglich. Bei großen Winkeln erfolgt die Winkelwahrnehmung in Arm und Schulter oder visuell, was wiederum eine Trennung ermöglicht.

Trotzdem besteht die Option, den Lenkwinkel des Fahrers, der aus reduzierten Wahrnehmungskanälen resultiert, mit einem Fahrermodell mit komplementären Wahrnehmungen zu überlagern und auf diese Weise eine Schrittfolge zu finden, indem der Fahrer um eine Anzahl von Wahrnehmungen reduziert wird, bis hin zum vollständigen Fahrermodell. Das Kapitel Fahrermodell zeigt eine solche Überlagerung.

1.3 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, den Einsatz von Simulationswerkzeugen auf die Entwicklung von elektromechanischen Lenksystemen auszuweiten. Der Bei-

trag, der hierzu geleistet wird, betrifft dabei die Objektivierung in der Absicherung dieser Lenksysteme. Dabei sollen die aufwändigen manuellen Tests des menschlichen Lenkverhaltens unter Einfluss von Störgrößen virtualisiert werden. Des weiteren soll die subjektive Bewertung dieser Störgrößen in einer Probandenstudie untersucht und objektiviert werden. Mit diesen Bausteinen wird ein Beitrag für die virtuelle Absicherung des Störgrößeneinflusses auf elektromechanische Lenksysteme geleistet, mit der Konsequenz von Kosteneinsparungen für spätere Systeme.

Die wahrgenommene Störgröße stammt in der folgenden Untersuchung immer aus der elektromechanischen Lenkung und wird als Zusatzmoment auf den Elektromotor aufgeschaltet. Im Allgemeinen sind aber auch Störgrößen vorstellbar, die von Seitenwind, Fahrbahnunebenheiten oder Reibwertänderungen verursacht werden.

Zum Nachweis unkritischer Fehlerauswirkungen, werden heute aufwändige Realfahrzeugtests gefahren, um subjektive Bewertungen zu generieren. Damit dieser Prozess vereinfacht werden kann, wird zusätzlich ein Fahrsimulator als Entwicklungsinstrument eingesetzt. Dieser weist die Besonderheit auf, dass das Lenkrad mit einer realen EPS verbunden ist und diese über einen hochdynamischen Linearmotor an der Zahnstange angetrieben wird. Die hohe Dynamik vermittelt dabei ein realistischeres Lenkgefühl.

In diesem Fahrsimulator werden die Subjektivurteile durch Probanden reproduziert, um sich der Frage zu nähern, wie gut der Prüfstand das Lenkgefühl nachbildet, siehe Abbildung 1.2.

In einem geeigneten Probandenversuch werden dann Messdaten generiert, die für die Validierung des Fahrermodells sowie für die Objektivierung der Probandenurteile genutzt werden. Dazu werden im Realfahrzeug Störgrößen bewertet und anschließend mit objektiven Kennwerten korreliert, um geeignete Kennparameter zu identifizieren. Nachfolgend wird eine Abbildung f konstruiert, welche zu einer Störgröße v_i mit gemessenen Kennparametern (p_1, \dots, p_m) die korrespondierenden Subjektivnoten (n_1, \dots, n_k) berechnet, dargestellt in Abbildung 1.3.

Gleichzeitig wird die Eignung des Fahrsimulators bezüglich der Bewertungen untersucht. Dazu fahren die Probanden einen Teil der Versuche am Fahrsimulator, um die Bewertungen anschließend miteinander vergleichen zu können.



Abbildung 1.2: Schritt 1 - Subjektivbewertungen im Fahr Simulator

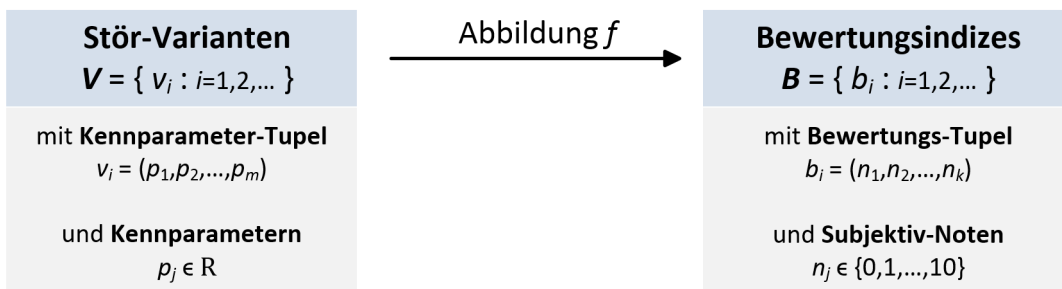


Abbildung 1.3: Schritt 2 - Objektivierung zur Berechnung der Subjektivnoten

2 Stand der Technik

Das im vorherigen Kapitel definierte Ziel der Arbeit wird nun mit dem Stand der Technik verglichen, um klar definierte Arbeitspakete hervorzuheben, die notwendig für die Umsetzung sind.

2.1 Aufbau und Funktion der EPS

Anforderungsgebend für den Aufbau und die Funktionen der EPS sind deren Schnittstellen mit dem Fahrzeug. Das sind die Zahnstangenanbindung mit der Achskinematik, die Lenksystemlager zur fixen Lagerung - zumeist am Hilfsrahmen - die Lenksäule als Fahrerschnittstelle sowie zur Führung in der Fahrzeugkarosserie, die elektrische Energieversorgung und die Anbindung an den Fahrzeugbus.

2.1.1 Aufbau

Mechanisch sind elektromechanische Lenksysteme heute fast ausschließlich als Zahnstangenlenkung ausgeführt. Unterschiede ergeben sich insbesondere in der Krafteinleitung der Unterstützungseinheit. Damit sind vor allem Zahnstangen- und Lenksäulenangetriebene EPS-Systeme zu unterscheiden.

In Abbildung 2.1 ist der mechanische Aufbau einer EPS mit achsparalleler Motoranordnung dargestellt. Das Steuergerät regelt den Elektromotor in Abhängigkeit vom Momentensensor und stellt dadurch die Unterstützungskraft an der Zahnstange ein.

Um die notwendige Unterstützungskraft zu ermitteln, wird ein Drehmomentensensor eingesetzt, der das vom Fahrer wahrgenommene Drehmoment misst und deshalb zwischen Lenkradkranz und Unterstützungseinheit positioniert sein muss, also notwendigerweise an der Lenksäule. Im Falle von zahnstangenangetriebenen Systemen sitzt dieser direkt nach dem Lenkritzel und bei lenksäulenangetriebenen Systemen am lenkradseitigen Antriebsausgang.

Nachfolgend sind die verbreitetsten mechanischen Varianten von EPS-Systemen beschrieben ([Pfeffer und Harrer \[2011\]](#)).

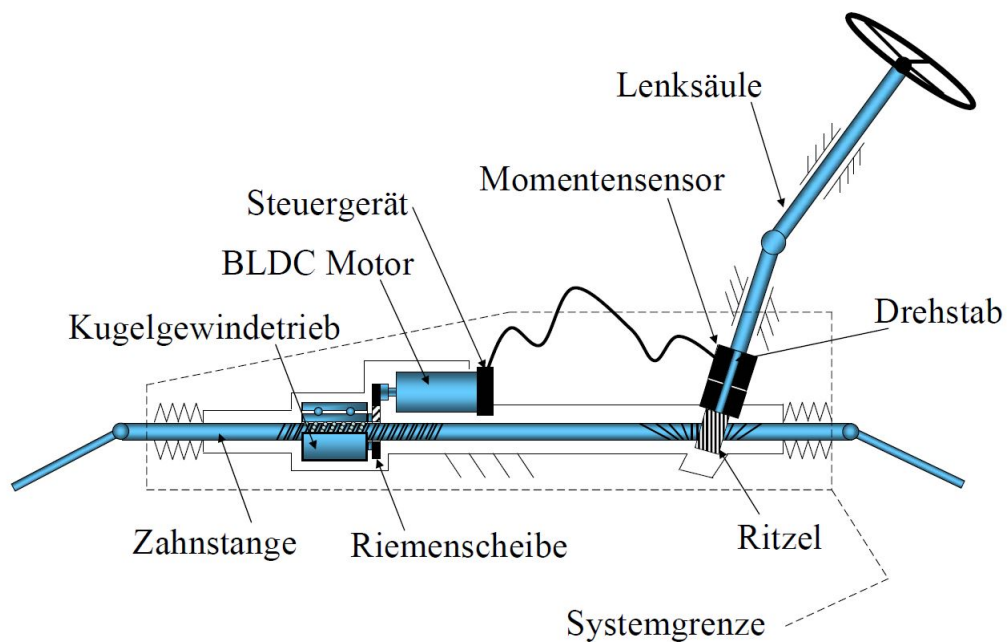


Abbildung 2.1: Schema des Aufbaus einer EPS, [Lunkeit \[2014\]](#)

APA

Das „APA“ im Name steht für achsparallele Anordnung der Motorachse zur Zahnstange. Es handelt sich um ein zahnstangen-angetriebenes System in Motorraummontage. Der Kraftschluss wird durch einen Kugelgewindetrieb umgesetzt, der sich durch einen hohen mechanischen Wirkungsgrad auszeichnet. Bemerkenswert ist hierbei die Eigenschaft des Kugelgewindetriebs, weil der Wirkungsgrad bei Umwandlung einer Drehbewegung in eine Längsbewegung höher ist als der Umkehrwirkungsgrad. Das spielt eine Rolle bei der Betrachtung der Rückmeldungseigenschaften einer EPS, weil unter anderem an dieser Stelle die Zahnstangenkraft gedämpft wird, siehe [Lunkeit \[2014\]](#). Zwischen Motor und Kugelgewindetrieb wird die Kraft durch einen Riemen übertragen, der gleichzeitig eine weitere Übersetzung realisiert. Abbildung 2.2 zeigt den schematischen Aufbau einer achsparallelen EPS.

Dual Pinion

Der einzige Unterschied dieser Variante zur APA ist, dass der Kraftschluss zwischen Motor und Zahnstange mit Schneckengetriebe und einem zweiten Ritzel an der Zahnstange erfolgt. Die Getriebeanordnung ist in Abbildung 2.3 zu erkennen.

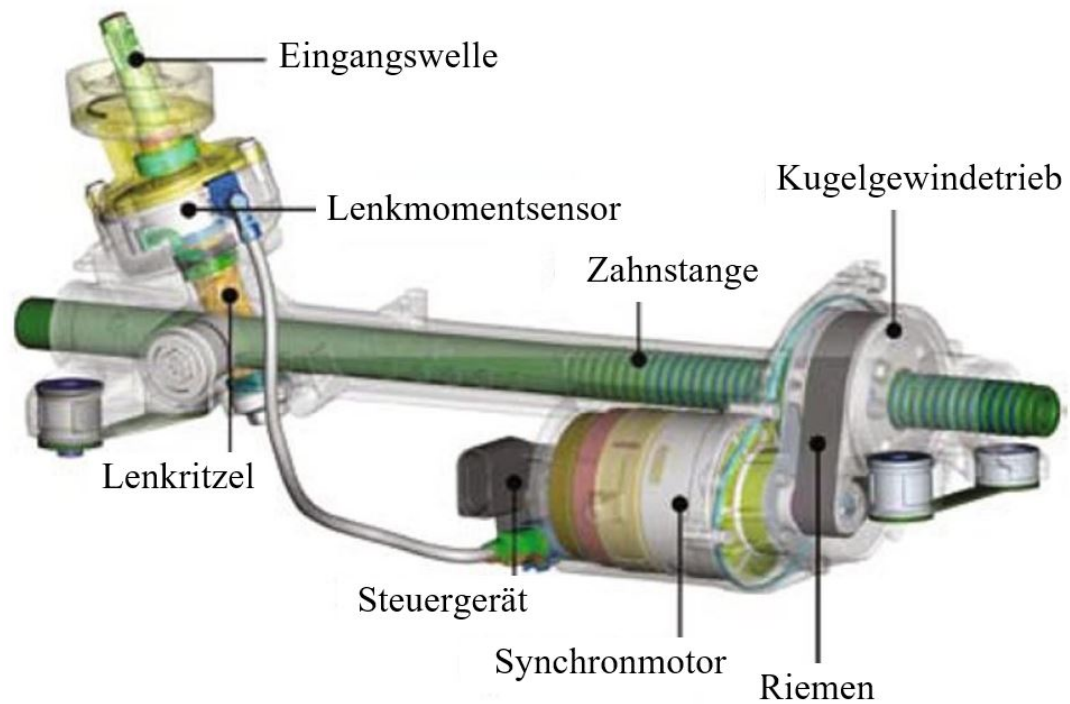


Abbildung 2.2: EPS mit achsparalleler Motoranordnung der Volkswagen AG, [Jablonski u. a. \[2008\]](#)

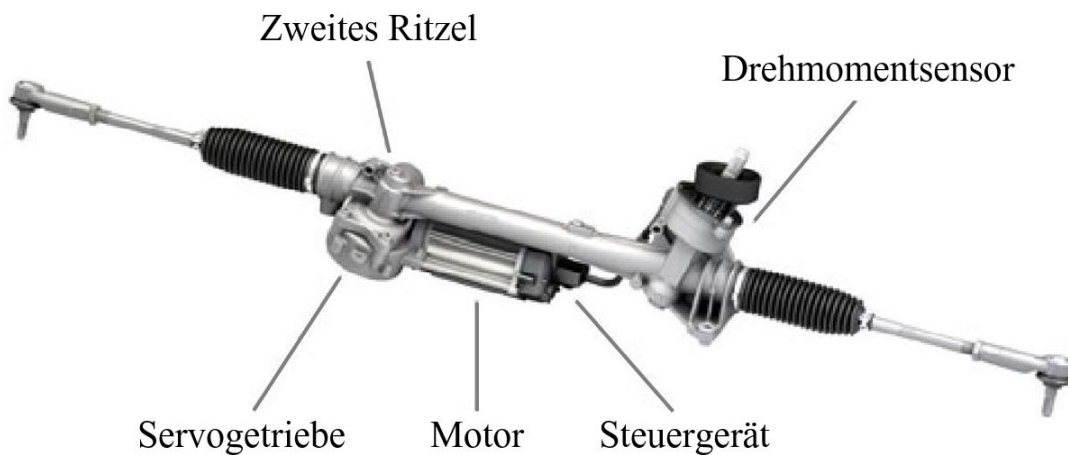


Abbildung 2.3: Dual Pinion EPS der Firma ZF Lenksysteme, [Pfeffer und Harter \[2011\]](#)

RCEPS

Ein weiterer Vertreter von zahnstangen-angetriebenen Systemen ist die „Rack-Concentric-EPS“. Der Motor ist koaxial um die Zahnstange angeordnet, sodass diese umschlossen wird. Der Kraftschluss wird auch hier durch einen Kugelgewindetrieb realisiert, der allerdings, im Vergleich zur APA, direkt an den

Rotor des Außenläufers gekoppelt ist. Einbauort ist wieder der Motorraum, einhergehend mit dessen Umgebungsanforderungen. Abbildung 2.4 zeigt eine Explosionszeichnung einer modernen RCEPS.

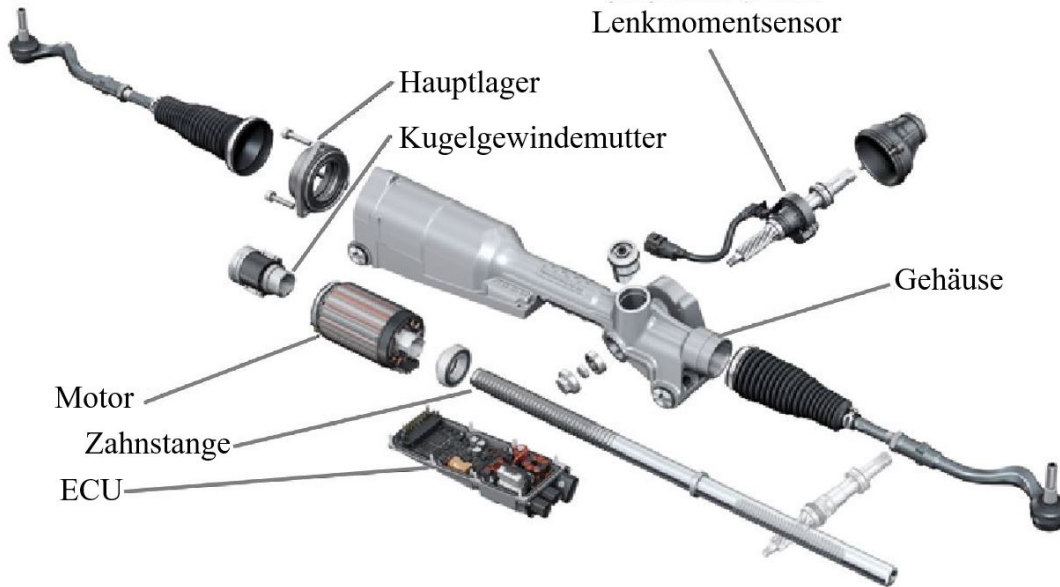


Abbildung 2.4: Aufbau RCEPS der Volkswagen AG, [Schöttler u. a. \[2012\]](#)

Column EPS

Hier ist die Lenksäule durch den Motor der Unterstützungseinheit angetrieben. Das Getriebe ist meist über ein Schneckengetriebe realisiert. Diese Systeme sind vor allem in kleineren Fahrzeugen anzutreffen, weil die Innenraummontage durch die geringen Umgebungsanforderungen Kostenvorteile zulässt. Den Aufbau zeigt die Abbildung 2.5.

2.1.2 Modellgleichungen

Wird das elektromechanische Lenksystem auf dem Niveau von gewöhnlichen Differentialgleichungen modelliert, entstehen dabei die im Folgenden angegebenen Modellgleichungen. Die Modellformulierung orientiert sich hier an [Lunkkeit \[2010\]](#). Dabei wird der Kugelgewindetrieb als Steifigkeits-Element approximiert, ein nichtlinearer Reibungsterm für die Zahnstange $d(x, \dot{x})$ benutzt und die Lenksäule fixiert. Der Motorwinkel ist hier ϕ und die Zahnstangenposition x . Motorseitige Parameter sind das Trägheitsmoment J_M , das Drehmoment T_M und die Motorreibung d_M . Die Kugelgewindetrieb-Kenngrößen sind die Übersetzung i_{KGT} , die Steifigkeit c_{KGT} und die Zahnstangenkraft F_Z . Ritzelseitige Kenngrößen sind die Übersetzung i_{TB} , die Steifigkeit c_{TB} sowie die

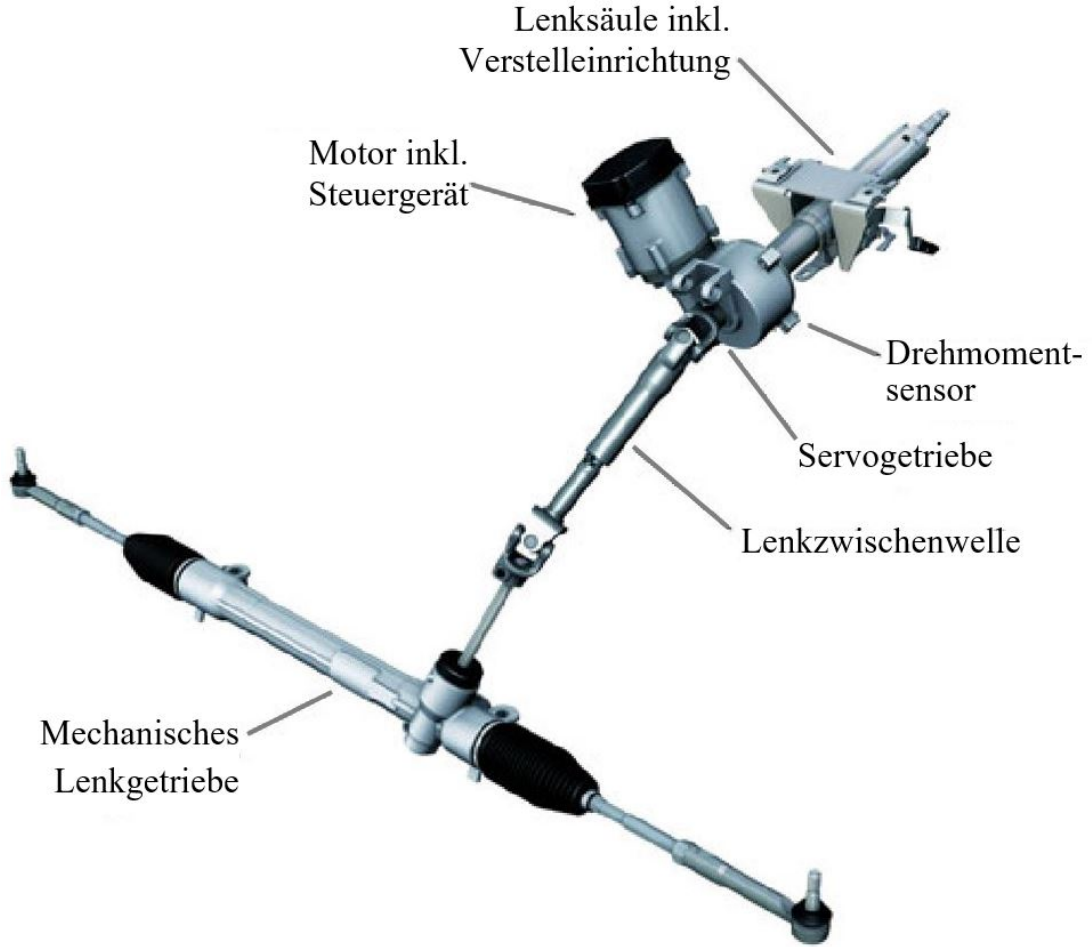


Abbildung 2.5: EPS mit Unterstützungseinheit an der Lenksäule, [Pfeffer und Harrer \[2011\]](#)

Masse der Zahnstange m_Z . Aus der Abbildung 2.6 kann nun das System aus zwei gewöhnlichen Differentialgleichungen zweiter Ordnung mit nichtlinearem Reibungsterm hergeleitet werden:

$$\begin{aligned}
 J_M \ddot{\phi} &= - \left(- \frac{1}{i_{\text{KGT}}} \cdot x + \phi \right) \cdot c_{\text{KGT}} - d_M \cdot \dot{\phi} + T_M \\
 m_Z \ddot{x} &= - d(x, \dot{x}) - \left(\frac{1}{i_{\text{TB}}} \right)^2 \cdot x \cdot c_{\text{TB}} \\
 &\quad + \left[- \left(\frac{1}{i_{\text{KGT}}} \right)^2 \cdot x + \phi \cdot \frac{1}{i_{\text{KGT}}} \right] \cdot c_{\text{KGT}} - F_Z.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Werden die Gleichungen in Matrizen-Struktur durch die Substitution der Terme zweiter Ordnung zu Termen erster Ordnung $y := \dot{x}$ und $\alpha := \dot{\phi}$ umformuliert, erhält man das System

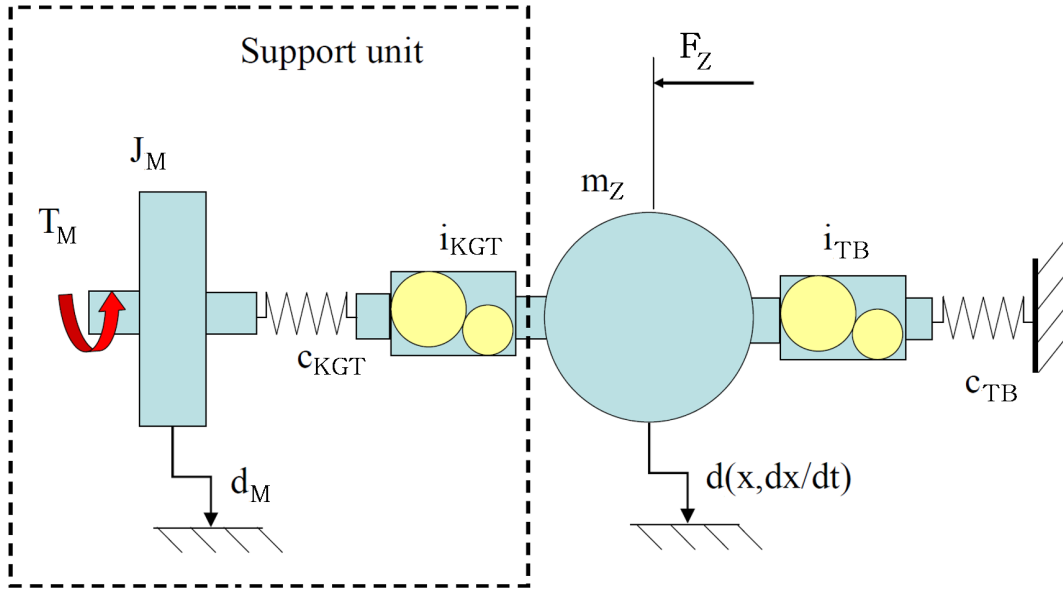


Abbildung 2.6: Blockschaltbild der EPS-Mechanik, angelehnt an [Lunkeit \[2010\]](#)

$$\dot{x} = y \quad (2.2)$$

$$\dot{y} = -\frac{1}{m_Z} \left[\frac{c_{TB}}{i_{TB}^2} + \frac{c_{KGT}}{i_{KGT}^2} \right] \cdot x + \frac{c_{KGT}}{m_Z \cdot i_{KGT}} \cdot \phi - \frac{F_Z}{m_Z} - \frac{d(x, y)}{m_Z} \quad (2.3)$$

$$\dot{\phi} = \alpha \quad (2.4)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{c_{KGT}}{J_M \cdot i_{KGT}} \cdot x - \frac{c_{KGT}}{J_M} \cdot \phi - \frac{d_M}{J_M} \cdot \alpha + \frac{T_M}{J_M}. \quad (2.5)$$

Wird das System trotz nichtlinearem Reibungsterm in einer linearen Systemstruktur ausgedrückt, ergibt sich die Systemgleichung

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{m_Z} \left[\frac{c_{TB}}{i_{TB}^2} + \frac{c_{KGT}}{i_{KGT}^2} \right] & 0 & \frac{c_{KGT}}{m_Z \cdot i_{KGT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_{KGT}}{J_M \cdot i_{KGT}} & 0 & -\frac{c_{KGT}}{J_M} & -\frac{d_M}{J_M} \end{pmatrix}}_{= A} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ \phi \\ \alpha \end{pmatrix} + \mathbf{b}(d(x, y)). \quad (2.6)$$

Aus diesem System kann nun die Konditionszahl nach [Deuffhard und Hohmann \[2002\]](#) berechnet werden, um die Empfindlichkeit der Eingangs- von den Ausgangsdaten zu bestimmen. Die betragsmäßig großen Elemente der

System-Matrix A , welche zu einer großen Kondition im Bereich $\mathcal{O}(10^8)$ führen, sind:

$$a_{21} = -\frac{1}{m_Z} \cdot \left(\frac{c_{TB}}{i_{TB}^2} + \frac{c_{KGT}}{i_{KGT}^2} \right) \quad (2.7)$$

$$a_{41} = \frac{c_{KGT}}{i_{KGT} \cdot J_M}. \quad (2.8)$$

Diese Elemente sind betragsmäßig deutlich größer als die anderen Elemente, weil die niedrige Übersetzung $i_{KGT} \approx 10^{-3}$ im Servogetriebe, gepaart mit einer hohen Steifigkeit $c_{KGT} \approx 10^2$, die Quotienten sehr groß werden lassen. Daraus ergibt sich zum Beispiel $a_{21} \approx 10^{10}$, was zu der schlechten Konditionszahl für A führt. Durch die schlechte Kondition des Systems wird deutlich, dass hohe Anforderungen an einen numerischen Algorithmus zur Lösung des Systems gestellt werden müssen. Das bedeutet insbesondere, dass eine Echtzeit-Simulation des Lenksystems im Steuergerät eine hohe Rechenleistung benötigt. Ein Echtzeitmodell könnte zum Beispiel für eine hochwertige Zahnstangenkraftschätzung notwendig sein.

2.1.3 Sicherheitskonzept

Funktionale Sicherheit

Der EPS-Motor eines modernen Fahrzeugs bringt durch die hohen Übersetzungsstufen deutlich mehr Lenkmoment auf, als der Mensch selbst am Lenkrad aufbringen könnte. Daher können Fehler während des Betriebs ein erhebliches Risiko für Mensch und Umwelt haben. Der Vergleich der Querführungskritikalität von Fahrzeugen und Flugzeugen ist qualitativ in Grell [2014] dargestellt. Hier wird die Fahrzeuglenkung sogar gefährlicher als die Flugzeugquerführung eingestuft, weil bei einer Fehlfunktion im Fahrzeug keinerlei Kontrolle über die Lateralführung mehr gegeben ist. Bei Flugzeugen hingegen kann bei einem Ausfall des Querruders das Seitenruder die Aufgabe übernehmen. Des Weiteren ist die Auslaufzone im Allgemeinen durch die Straße begrenzt, während ein Flugzeug viel Raum zum Manövrieren zur Verfügung hat.

Sicherheitstechnisch fällt die Systemsicherheit der EPS in die Zuständigkeit der Norm ISO 26262, die sich mit sicherheitsrelevanten elektrischen Systemen in Kraftfahrzeugen auseinandersetzt.

Zusammengefasst bedeutet das, dass ein Fehler in der EPS sehr schnell gefährliche Folgen haben kann, weshalb diese Fahrzeugkomponente als besonders sicherheitskritisch eingestuft und mit aufwändigen Entwicklungsprozessen entwickelt wird.

Rechtliche Aspekte

Hersteller von Verbraucherprodukten wie zum Beispiel Straßenfahrzeugen haben eine Verkehrssicherungspflicht. Diese Produkte dürfen nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn die Sicherheitserwartungen der Verbraucher nach dem Stand der Technik erfüllt werden. Das Produkthaftungsgesetz regelt in Deutschland die Haftung eines Herstellers bei fehlerhaften Produkten und unterliegt dem Zivilrecht. Der Hersteller haftet sogar bei nicht vermeidbaren Fehlern an Einzelstücken, womit dieser Sachverhalt eine treibende Kraft des aufwändigen Sicherheitskonzepts der EPS ist. Eine Norm erfüllt dabei den Zweck, im Wesentlichen den Stand der Technik aufzuzeigen.

Die Norm ISO 26262

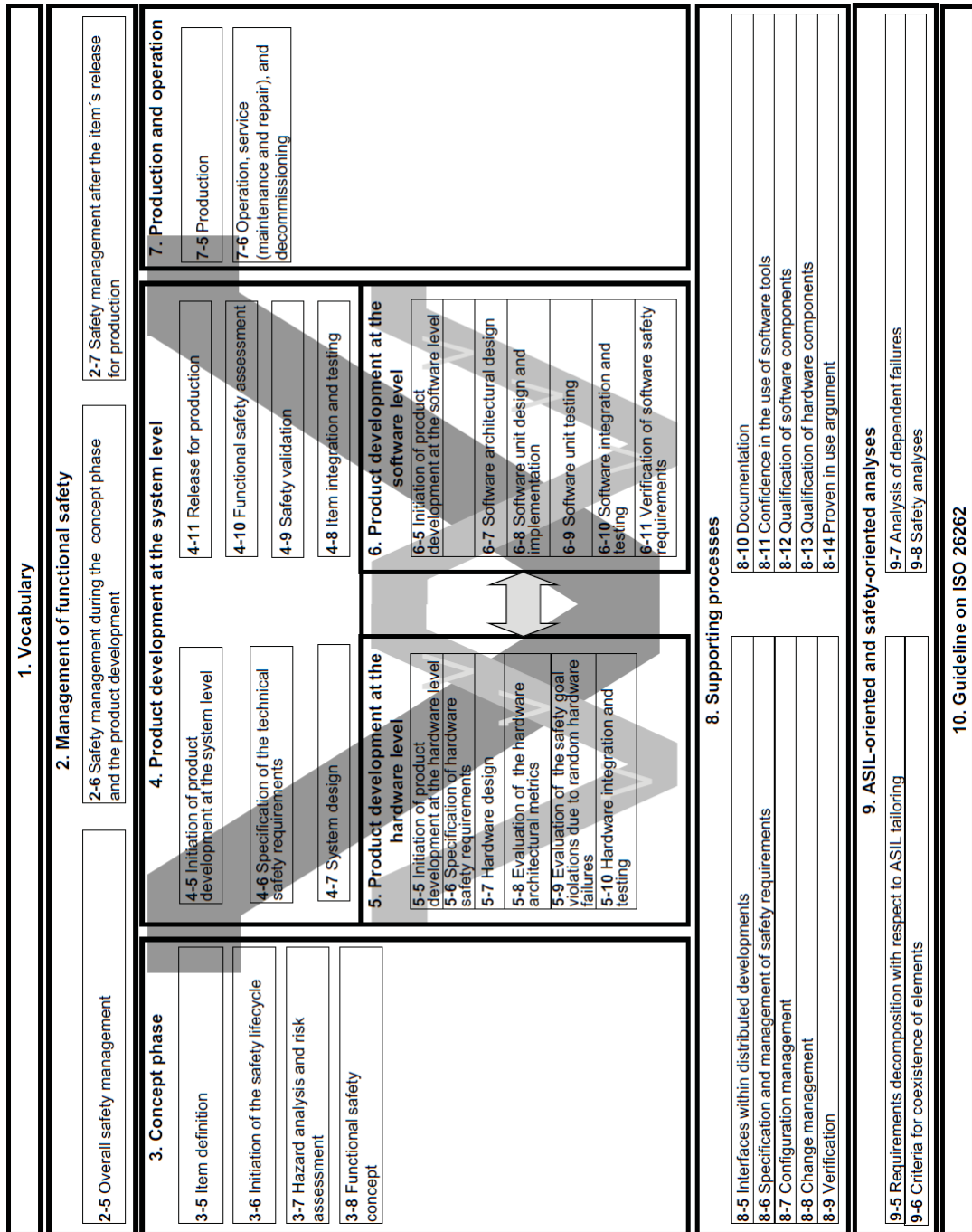
Im November 2011 wurde die Norm ISO 26262 fertiggestellt [ISO 26262-1 \[2011\]](#). Darin sind Entwicklungsprozesse definiert, welche notwendig sind, um das Produkthaftungsrisiko zu reduzieren.

V-Modell - Die zehnbändige Norm besteht strukturell aus einem V-Modell als Referenzprozess für alle Phasen der Produktentwicklung, dargestellt in Abbildung [2.7](#).

Die Bände der Norm - In [\[ISO 26262-3, 2011, Kap. 7\]](#) ist die Gefährdungs- und Risikoanalyse normiert, deren Ziel es ist, Gefährdungen zu identifizieren und zu kategorisieren. Daraus werden die Sicherheitsziele formuliert, mit der Absicht, unzumutbare Gefährdungen für den Menschen abzuwenden. Diese Ziele werden definiert durch Gefährdungsanalyse, Risikobewertung und ASIL-Einstufung. Diese Einstufung basiert auf dem funktionalen Verhalten des zu bewertenden Systems, weshalb der Aufbau nicht notwendigerweise bekannt sein muss.

Band 4 [ISO 26262-4 \[2011\]](#) normiert die Sicherheitsaktivitäten der Produktentwicklung auf Systemebene und den Teilsystemen. Das Kapitel 9 beinhaltet die sogenannte Sicherheitsvalidierung. Darin geht es zum einen um den Nachweis der Umsetzung der Sicherheitsziele aus dem Sicherheitskonzept sowie darum, dass das funktionale Sicherheitskonzept für die funktionale Sicherheit des Systems geeignet ist. Zum anderen wird nachgewiesen, dass die Sicherheitsziele auf Fahrzeugebene korrekt und vollständig umgesetzt sind.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode vorgestellt, um in Zukunft maximale Motormomente des Subsystems EPS bereits in der Konzeptphase zu definieren. Des Weiteren kann auf Basis dieser Methode die Sicherheitsvalidierung virtuell durchgeführt werden.

Abbildung 2.7: Die V-Modell-Struktur der [ISO 26262-1 \[2011\]](#)

2.1.4 Lenkfunktionen

Die gestellte Kraft der Unterstützungseinheit wird im Steuergerät der ECU berechnet. Diese Berechnung ist das Ergebnis aus mehreren Lenkfunktionen, deren Teilberechnungen sich zu einem Gesamtmoment ergeben. Die Ausgangsdaten für diese Berechnung kommen aus der Peripherie-Sensorik der ECU und

den Fahrzeugbussignalen.

Die wichtigsten Sensoren sind der bereits angesprochene Drehmomentsensor und der Motorlagesensor. Mit Letzterem kann die Position sowie die Geschwindigkeit der Zahnstange berechnet werden. Über den Verdrehwinkel des meist als Verdrehstab ausgelegten Drehmomentsensors, kann ebenso der Lenkwinkel und die Lenkwinkelgeschwindigkeit berechnet werden.

Bedeutende Fahrzeugbussignale für die Lenkfunktionen sind allen voran die Fahrzeuggeschwindigkeit und für dynamisch ausgelegte Lenkfunktionen die Querschleunigung.

Nachfolgend werden bedeutende Lenkfunktionen vorgestellt, welche die erlebbare Funktion einer EPS ausmachen (Pfeffer und Harrer [2011]). Grundsätzlich wird dabei zwischen Motormomentregelung und Handmomentregelung unterschieden.

Motormomentregelung

Die Lenkfunktionen berechnen aus den oben genannten Eingangssignalen jeweils ein Motor-Sollmoment, aus denen mittels Superposition das Signal generiert wird, das zum Motorregler führt. Dieser sorgt nun dafür, dass das berechnete Sollmoment als mechanisches Ist-Moment an der Motorwelle anliegt. In Pfeffer und Harrer [2011] werden die Lenkfunktionen in Lenkkraftunterstützung, Reibungskompensation, Trägheitskompensation und Dämpfung unterteilt. Diese Gliederung gilt für eine Funktionssicht, die an hydraulische Lenkungen angelehnt ist, weil das Regelungsschaubild gleich ist.

Unterstützungsfunktion - Die bekannteste Funktion ist die der Unterstützung, die letztendlich die Kraftreserven für den Fahrer zur Verfügung stellt, um die Räder zu lenken. Die Eingangsgrößen dieser Funktion sind Handmoment und Fahrzeuggeschwindigkeit, aus denen mittels einer Kennlinie das Unterstützungsmoment berechnet wird.

Dämpfung - Regelungstechnisch bildet diese Funktion eine Kombination von Dämpfungsgliedern unterschiedlicher Ordnung ab, um das System stabil und frei von Schwingungen zu halten.

Reibungskompensation - Das Reibungsmodul wirkt der Systemreibung entgegen, wobei zwischen Haft- und Gleitreibung unterschieden wird. Eingangsgrößen sind wie bei dem Reibungsglied $d(x, \dot{x})$ aus Gleichung 2.1 Zahnstangenposition und Geschwindigkeit. Damit kann mit einem vereinfachten Lenkungsmodell und vorab durchgeführten Reibungsversuchen die Systemreibung prädiktiv bestimmt und kompensiert werden.

Trägheitskompensation - Bedingt durch die hohe Übersetzung zwischen Motor und Zahnstange sowie dem Trägheitsmoment des Motors, ist die effektive Trägheitsmasse der Zahnstange sehr hoch. Dem wird mit einer Trägheitsfunktion zweiter Ordnung entgegengewirkt, die ähnlich wie die Reibungskompensation arbeitet, aber insbesondere von der Beschleunigung der Zahnstange abhängt.

Handmomentregelung

Ein alternatives Konzept ist die Regelung des Handmoments, beschrieben in [Henrichfreise u. a. \[2003\]](#). Bei diesem Konzept ist das Handmoment frei programmierbar, weil es die zu regelnde Größe ist. Voraussetzung ist, dass hinreichend genaue Zustandsgrößen vorliegen. Diese Regelungsart hängt insbesondere stark von der Zahnstangenkraft ab, sodass diese geschätzt werden muss. Der Handmomentregler hängt somit von der Genauigkeit der Zahnstangenkraftschätzung ab und damit auch sein volles Potential der freien Programmierung. Die Handmomentregelung kann weiterhin auf besonders einfache Weise zu einem Steer-By-Wire Konzept ausgebaut werden.

Unterstützungsfunktion - Hierfür ist die Zustandsgröße „Zahnstangenkraft“ notwendig, die entweder gemessen oder geschätzt werden muss. Aus der inversen Unterstützungskraftkennlinie der klassischen Unterstützungsfunktion von EPS-Systemen kann dann das Soll-Drehstabmoment vorgegeben werden.

Konzeptübergreifende Funktionen

Unabhängig von der Regelungsart gibt es noch die Komfortfunktionen, die erst mit der EPS als neue Lenk-Funktionalitäten ermöglicht werden.

Aktiver Rücklauf - Bei Fahrzeugen mit einer hydraulischen Lenkung sorgt die Achskinematik dafür, dass sich beim Radeinschlag der Vorderwagen hebt und somit eine Rückstellkraft auf die Räder in Geradeausstellung ausgeübt wird. Außerdem erfolgt die Rückstellung der Radlenkwinkel in die Geradeausposition durch den Reifennachlauf. Diese mechanischen Rückstell-Funktionen können in der EPS aktiv gestellt werden, sodass Achskonstruktionen mit mehr Freiheitsgraden möglich sind, weil die selbstständige mechanische Rückstellung der Räder durch die EPS abgebildet werden kann.

Lenkgefühl-Modi - Um verschiedene charakteristische Ausprägungen des Lenkgefühls zur Auswahl zu haben, werden die Haupt-Lenkfunktionen für den Fahrer auf Knopfdruck mit verschiedenen Parametersätzen bedatet. Diese Parametrierung wird dabei so ausgelegt, dass die Spanne vom sportlichen bis komfortablen Lenkgefühl abgedeckt ist.

Software-Endanschlag - Die mechanischen Endanschläge der Zahnstange können mit dieser Funktion zum einen geschützt und zum anderen begrenzt werden. Dazu wird die Zahnstangenposition gemessen und ab einer bestimmten Position das Motormoment in Gegenrichtung erhöht, sodass der Fahrer nicht in die mechanischen Anschläge lenken kann. Haptisch sind die Software-Endanschläge so implementiert, dass der Fahrer kaum einen Unterschied zu einem mechanischen Anschlag spürt.

Geradeauslaufkorrektur - Bedingt durch quer eingebaute Motor-Konzepte oder asymmetrische Allrad-Antriebsstränge und das damit verbundene Getriebe- sowie Motor-Packaging können die linke und rechte Antriebsachse der Vorderachse unterschiedlich lang ausgeführt sein. Diese Asymmetrie führt bei longitudinaler Beschleunigung zu einem Schiefziehen des Fahrzeugs, was durch eine Geradeauslaufkorrektur kompensiert werden kann.

Spurhalte-Assistent und Parklenkassistent - Die zunehmende Verbreitung von Fahrerassistenzsystemen wird durch die EPS überhaupt erst möglich, weil hier externe Lenkwinkel oder Lenkmomente vom Steuergerät des Assistenzsystems vorgegeben werden können. Damit wird die Lenkung zum Lenkroboter und Wegbereiter für autonomes Fahren. Eine wichtige Aufgabe der Lenkfunktionen ist es hier, den angeforderten Zustand sicher umzusetzen und auf Plausibilität zu prüfen.

Wie bereits eingangs erwähnt, sind es diese Lenkfunktionen, die innerhalb der Sicherheitsgrenzen für das softwareseitige Lenkgefühl sorgen. Welche Werte diese Grenze bilden, wird in dieser Arbeit untersucht.

2.2 Wahrnehmung lateraler Fahrzeugführung

Die Kognitionswissenschaft im Kontext des Lenkgefühls ist der interdisziplinäre Zusammenschluss zwischen Psychologie, Neurowissenschaft und Informatik, insbesondere künstlicher Intelligenz, [Urchs \[2002\]](#). In der Kognitionswissenschaft werden die zwischen Sensorik und Motorik vermittelnden, bewussten oder unbewussten Prozesse untersucht, analysiert und letztendlich modelliert.

Die Wahrnehmungspsychologie gliedert die Wahrnehmung in einen subjektiven und objektiven Anteil und definiert den subjektiven Anteil als Untersuchungsobjekt. Der objektive Anteil besteht dabei definitionsgemäß aus der Sinnesphysiologie. Im Folgenden werden die für das Lenkgefühl dominierenden Sinneswahrnehmungen und ihre messtechnische Erfassungsgenauigkeit beschrieben. Sinne werden dabei durch physikalische Größen repräsentiert, wobei die Sinne in mehrdimensionale Wahrnehmungen unterteilt werden können.

Weber-Fechner-Gesetz

Das Weber-Fechner-Gesetz von 1860 [Weber \[1996\]](#) kommt aus dem Fachgebiet der Psychophysik und verknüpft objektive Reizstärken mit der subjektiven Empfindung. Die subjektiv empfundene Stärke von Sinneseindrücken ist proportional zum Logarithmus der objektiven Intensität des physikalischen Reizes, ausgedrückt durch den Zusammenhang

$$E = c \cdot \ln \frac{R}{R_0}. \quad (2.9)$$

Die subjektive Empfindung ist durch E repräsentiert, die physische Reizstärke durch R , der Schwellreiz mit R_0 und c ist eine Konstante der Reizart. Das Gesetz legt also die Empfehlung nahe, subjektive und objektive Größen eines physischen Wahrnehmungskanals in einen logarithmischen Zusammenhang zu bringen.

Wolf (2009) - Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen

Einen umfassenden Überblick über Sinneswahrnehmung in Bezug auf das Lenkgefühl gibt die Arbeit von [Wolf \[2009\]](#). Darin unterteilt der Autor das Lenkgefühl in engeres und erweitertes Lenkgefühl, basierend auf einer experimentell getrennten Untersuchung der Wahrnehmungen. Des Weiteren werden Wahrnehmungsschwellen gemessen, wovon insbesondere die Hand als sehr schneller und feinfühligster Sinneskanal für die motorische Wahrnehmung identifiziert wird.

Visuelle Wahrnehmung - Eine dynamische Wahrnehmungsschwelle für sich bewegendes Objekte wird in [Lindsay und Norman \[1972\]](#) angegeben. Dort ist eine Winkelminute pro Sekunde genannt. Diese Zeitkonstante ist bedeutend

für den optischen Fluss, mit dem der Mensch Bewegungen seines Umfelds erfasst. In der Bildverarbeitung und in der optischen Messtechnik wird dabei der optische Fluss als ein Vektorfeld bezeichnet, das die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit für jeden Bildpunkt einer Bildsequenz angibt.

Wesentliche Lenkverhaltens-Kenngrößen, die visuell wahrgenommen werden, sind die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Gierrate als optischer Fluss sowie Schwimmwinkel, Wankwinkel und Lenkwinkel.

[Wolf, 2009, S. 169ff.] beschreibt außerdem Versuche zum optischen Fluss, bei denen Probanden eine Sichtfeldsimulation mit verschiedenartigen Flussinformationen präsentiert wird. Als Ergebnisse dieser Untersuchung werden erstens die Identifizierung wichtiger optischer Wahrnehmungsmerkmale genannt und zweitens, dass der Fahrer aus der visuellen Informationsaufnahme weitaus mehr Informationen nutzt als bislang angenommen. Zum Beispiel wird die Erkennung von Untersteuern oder Übersteuern des Fahrzeugs bei niedrigen Geschwindigkeiten mittels optischer Wahrnehmung nachgewiesen. Als optische Wahrnehmungsmerkmale werden unter anderem der Scheitelpunkt und das Zentrum des Auseinanderfließens des optischen Flusses genannt.

Kinästhetische Wahrnehmung - Hierzu schreibt [Wolf, 2009, S. 58ff.], dass aus der wissenschaftlichen Literatur nicht klar zu entnehmen ist, ob das vestibuläre Organ die Rotationsgeschwindigkeiten oder -beschleunigungen misst, weil die Trennung dort nicht scharf genug vorgenommen und häufig vermischt wird. Er kommt zu dem Schluss, dass den Winkelbeschleunigungen, bezüglich Gieren und Rollen, eine höhere Bedeutung als den Winkelgeschwindigkeiten zugemessen werden sollte.

Einer der durchgeführten Versuche war die Querbeschleunigungsmessung in Kopfnähe während der drei Fahrmanöver des ISO-Spurwechsels. Dabei zeigte sich, dass die Mitbewegung des Körpers bei Kurvenfahrt die Verzugszeit zur Wahrnehmung der Querbeschleunigung verkürzt und der Fahrer dadurch eine schnellere Rückmeldung erhält. Insgesamt wurden in diesen Versuchen bei vier Fahrern relativ große Streuungen festgestellt, wobei auch anzumerken ist, dass die Querbeschleunigungsmessung in Kopfnähe nicht kreiselstabilisiert war und Untersuchungen dazu noch ausstehen. Kreiselstabilisiert bedeutet, die Projektion der Querbeschleunigung auf einen künstlich berechneten Horizont. Da der Mensch den Horizont durch den visuellen Sinneskanal mit der Querbeschleunigungswahrnehmung fusioniert, erscheint der Vergleich mit der Kreiselstabilisierung der Querbeschleunigung am Kopf interessant.

Lenkkraftwahrnehmung - Ein weiterer Versuch diente der Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen für die Lenkkraftwahrnehmung mithilfe eines Fahrzeugsimulators. Dabei ergaben sich allerdings Standardabweichungen, mit denen die Gültigkeit des Weberischen Gesetzes 2.2 nicht nachgewiesen werden

konnte. Beachtlich ist aber das Ergebnis, dass Lenkmomenterhöhungen „empfindlicher“ als Lenkmomentverminderungen wahrgenommen werden. Des Weiteren ist dieser Effekt bei 4 Nm deutlicher sichtbar als bei 2 Nm, außerdem empfinden die Probanden bei Verminderungen des Lenkmoments uneinheitlicher.

2.3 Objektivierung von Lenkgefühl

Allgemein formuliert geht es bei der Objektivierung von Bewertungen immer darum, einen Zusammenhang zu finden, um verschiedene Ausprägungen eines Systems und dessen Bewertungen durch ein menschliches Urteil zu verknüpfen. In der klassischen Objektivierung werden die Systeme dazu einerseits von Experten subjektiv beurteilt und andererseits in definierten Fahrmanövern objektiv vermessen. Aus diesen Datensätzen wird dann durch Korrelation eine Abbildungsvorschrift generiert. Diese Abbildung kann entweder ein mathematischer Algorithmus oder im Erfahrungsschatz einer Expertenperson verankert sein.

2.3.1 Subjektive Bewertung des Fahrverhaltens

Um Fahrmanöver subjektiv zu bewerten, werden diese in einer geschlossenen Regelschleife mit einem menschlichen Fahrer durchgeführt. Dabei beurteilt der Fahrer das Lenkgefühl im Fahrzeug qualitativ und bewertet es bei Bedarf sogar quantitativ mittels seines Erfahrungsschatzes aus zurück liegenden Fahrversuchen. Letzteres wird auch als Expertenurteil bezeichnet und aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit auch als verlässlicheres Subjektivurteil eingestuft, [Harrer \[2007\]](#).

Beurteilungs-Ebenen

Kategorienbildung und Klassifizierungen von Lenkgefühl finden sich in [Gies und Marusic \[1998\]](#). Dort wird ein Beurteilungsschema mit vier verschiedenen Ebenen vorgeschlagen, mit zunehmender Beurteilungstiefe pro Ebene, Abbildung 2.8.

Bezogen auf das Lenkgefühl, wird auf Ebene III zwischen Ansprechen, Mittengefühl, Lenkaufwand und Modulation unterschieden. Die vierte Ebene wird in dem Schema als Sensor interpretiert, zum Beispiel Lenkungstotband, Lenkmomentaufbau oder Reibung. In der vorliegenden Arbeit werden, ausgehend von der Ebene II, die Lenkungsstörungen behandelt.

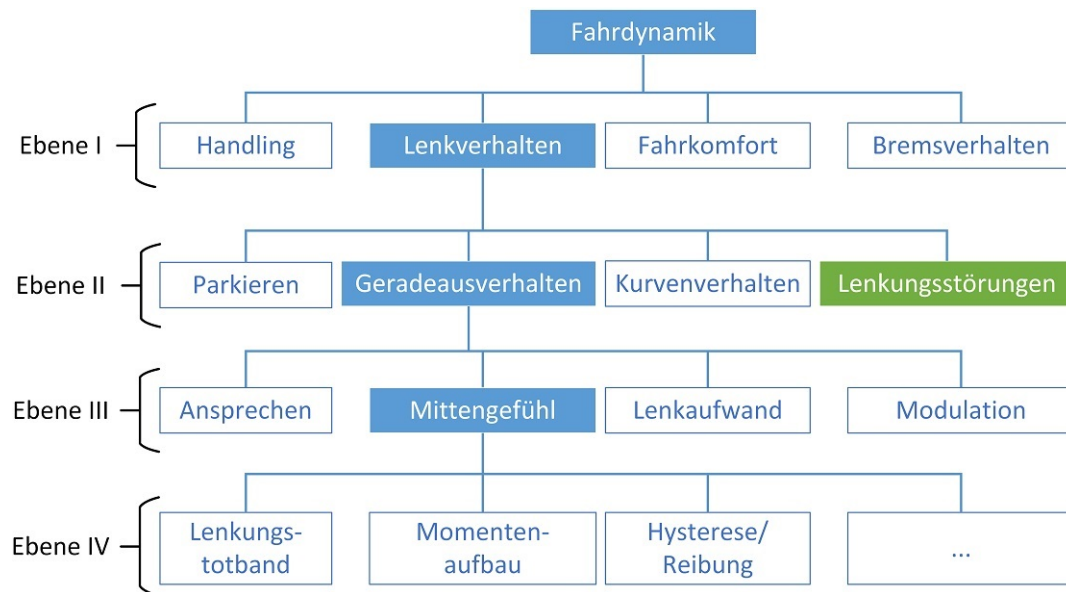


Abbildung 2.8: Vier-Ebenen Beurteilungsschema, angelehnt an [Gies und Marusic \[1998\]](#)

Detaillierte Beurteilungskriterien

In [Heißing und Brandl \[2002\]](#) werden umfassend subjektive Bewertungskriterien für verschiedene Fahrmanöver vorgestellt. Insbesondere sind darin praxisübliche Fahrmanöver definiert, die eine Bewertung des Lenkverhaltens ermöglichen [[Heißing und Brandl, 2002](#), Kap. 7.3]. Für das Lenkgefühl werden dort subjektive Beurteilungskriterien ermittelt, die in Tabelle 2.1 zusammengefasst sind. Darin ist zum Beispiel das berühmte „Center Point“-Kriterium angegeben, das in einem typischen Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis zur Höchstgeschwindigkeit bewertet wird. Dieses Szenario wird meist auf geraden Autobahnabschnitten praktiziert, indem das Lenkrad mittels einer Anlenkbewegung aus der Mitte herausgelenkt wird, bis eine vom Fahrer spürbare Fahrzeugreaktion eintritt. Bewertet wird dann die Amplitude des für die Rückstellung notwendigen Lenkwinkels, das Lenkmoment sowie die Gierreaktion des Fahrzeugs. Auch der Rücklauf des Lenkrads und die Fahrzeugreaktion, bei Lenkungsfreigabe nach dem Anlenkvorgang, sind wichtige Bewertungskriterien für das Center-Point Lenkgefühl. Hier wird bereits deutlich, dass die Bewertung der „notwendigen Amplituden“ ein Prozess ist, der von einem Expertenfahrer anhand seiner Erfahrungen ausgeführt werden muss.

Ein weiteres leicht fühlbares Kriterium ist die Reibung der Lenkung. Subjektive Bewertungsgrößen sind hier Schwammigkeit, Trägheit oder ein gefühlter Losbrech-Effekt des Lenkrads.

Die in der gezeigten Tabelle dargestellten Bewertungskriterien stellen nach [Heißing und Brandl \[2002\]](#) einen bewährten Umfang dar, um das Lenkgefühl in einem weiten Bereich qualitativ zu erfassen.

Kriterium	Geschw.	Fahrbahn	Fahrmanöver	Beurteilung
Anlenkverhalten	60 ... v_max	gerade, homogen, nass und trocken	Schnelles Anlenken des Fahrzeugs bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Lenkwinkel, Spurwechsel, Kurveneinlenken	Aufbau der Fahrzeugbewegung nach Anlenken, Zeit- und Phasenverzug
Ansprechverhalten	30 ... v_max	gerade, homogen, nass und trocken, Längsrillen, unterschiedliche Trassierung	Sinusförmiges Anlenken des Fahrzeugs bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, beginnend mit kleinem Lenkwinkel und Momenten, der bis zur deutlichen Gierreaktion gesteigert wird	Fahrzeugreaktion auf leichte Lenkbewegungen zur Kurshaltung, Aufbau der Gierreaktion bei kleinen Lenkwinkel und Momenten
Zielgenauigkeit	100 ... v_max	eben und uneben, Kurven unterschiedlicher Radien, langgezogene Kurven	Fahren der Strecken mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten	Kursabweichungen, erforderliche Lenkkorrekturarbeit, Bewältigung von Störgrößen
Center Point	100 ... v_max	gerade, homogen, nass und trocken	Auslenken bis zu minimalen Fahrzeugbewegungen, Zurückführen des Lenkrades in Mittelstellung, später mit freigegebenem Lenkrad	Lenkwinkel, Moment und Gierreaktion beim Anlenken, Lenkungsrücklauf nach Lenkungsfreigabe, Mittengefühl
Grabeneffekt	80 ... v_max	gerade, homogen, nass und trocken	leichtes Anlenken bis zügige Spurwechsel	Selbstzentrierung bei Geradeausfahrt, Harmonie beim Übergang in die Lenkungsphase
Geradeauslauf	80 ... v_max	nass und trocken, Spurrillen, Fahrbahn mit unterschiedlichen Reibwerten	Geradeausfahrt unter Störgrößen wie Überholmanöver, Seitenwind, Spurrillen, unterschiedliche Fahrbahnreibwerte, Baustellendurchfahrt	Lenkaufwand zur Kurshaltung, Lenkmoment, Häufigkeit der Lenkeingriffe, Behagen bei engspurigen Überholmanövern
Fahrbahnkontakt	30 ... v_max	gerade und verschieden gekrümmte Fahrbahnen mit unterschiedlichen Reibwerten	Kurvenfahrt bis zur Haftgrenze	Rückmeldung über Fahrbahnbeschaffenheit, Gripp, Reserve zur Haftgrenze, Größe Lenkmoment und Schwankungen im Verhältnis zur Geschwindigkeit, Vortrieb und
Reibung	30 ... v_max	gerade und verschieden gekrümmte Fahrbahnen mit unterschiedlichen Reibwerten	Alltagsmanöver und Autobahnfahrten mit unterschiedlichen Lenkmanövern, Lenkwinkel und Moment variieren, so dass ein Haptikgefühl entsteht	Lenkgefühlkriterien sind Teigigkeit, Schwammigkeit, Dynamik, Trägheit, etc.
Rücklauf / Überschwngen	0 ... 120	Übergänge von engen Kurven unterschiedlicher Radien in Geraden, unterschiedliche Fahrbahnbeschaffenheit	langsameres Anfahren mit eingeschlagenem Lenkrad, Fahren von Einfädel- und Abbiegemanövern, aus Kurven in Geraden fahren bei unterschiedlichen Beschleunigungen, das Lenkrad wird teilweise freigegeben, teilweise durch die Hand gleiten gelassen, Spurwechsel, nach eingeschlagenem Lenkrad Hands-Off	Rückstellung harmonisch, Rückstellkraft und -geschwindigkeit, Rückstellung zur Mitte, Höhe des Überschwngens der Mittenposition

Tabelle 2.1: Bewertungstabelle für Lenkgefühl, angelehnt an [Heißing und Brandl \[2002\]](#)

Lenkgefühl-Spezifika

Einen angepassten Beurteilungskatalog für Lenkgefühl-Versuche präsentiert [Zschocke \[2009\]](#), dieser ist in Tabelle 2.2 dargestellt. Darin werden die Bewertungen zweidimensional ordinalskaliert erfasst. Eine Dimension entspricht der Intensität, während die andere nach dem Gefallen bewertet wird. Zum Beispiel wird bei dem Lenkgefühlkriterium „Reibung“ einerseits die Intensität bewertet, was als schwer- oder leichtgängig beschrieben werden könnte, und andererseits das Gefallen. Letzteres hängt allerdings zum Beispiel davon ab, ob das Fahrzeug komfortorientiert oder sportlich ausgelegt sein soll und rechtfertigt damit die unabhängige zweite Bewertungsdimension.

2.3.2 Objektive Kenngrößen des Fahrverhaltens

Open-Loop Tests

Hier werden entweder Lenkwinkel oder Lenkmoment gestellt, so dass diese Tests mit einem Lenkroboter gefahren werden können. Die folgenden, in der ISO genormten Manöver, sind etablierte Methoden, um Kenngrößen zu gewinnen. Dazu gehören die einzelne Sinusperiode [ISO/TR 8725 \[1988\]](#), der doppelte Spurwechsel [ISO 3888-1 \[1999\]](#), der Weave-Test [ISO 13674-1 \[2010\]](#), der Transition-Test [ISO 13674-2 \[2006\]](#), die Sprungantwort [ISO 7401 \[2011\]](#) und die stationäre Kreisfahrt [ISO 4138 \[2012\]](#).

Closed-Loop Tests

Ein Test im Closed-Loop bedeutet, dass ein Fahrer das Fahrzeug am Lenkrad führt. Während des Manövers kann gleichzeitig eine Subjektivbewertung durchgeführt werden. Intra- und inter-individuelle Unterschiede in der Fahrmanöverdurchführung erschweren hier die Generierung von objektiven Kenngrößen, [Harrer \[2007\]](#).

Eckstein (2001) - Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks

In [Eckstein \[2001\]](#) wird eine Untersuchung zur Fahrgüte mit Side-Sticks vs. Lenkrad im Fahrsimulator durchgeführt. Dabei werden verschiedene Kriterien entwickelt, um die menschliche Regelaufgabe der Fahrzeugführung bei unterschiedlichen Lenkmethoden zu vergleichen. So lässt sich die querdynamische Fahrgüte anhand folgender Kriterien beurteilen: der Standardabweichung

der Querabweichung, Standardabweichung des Gierwinkelfehlers, Standardabweichung der Querschleunigungsdifferenz, Time-to-line-crossing, Mittelwert der Distance-to-line-crossing sowie einem statistischen Regelfaktor. Daraus werden Leistungsmaße abgeleitet wie Gierwinkelfehler-Leistungsmaß und Querabweichung-Leistungsmaß.

Der Autor stellt also ein Verfahren vor, um objektive Kennwerte aus den vorgesehenen Versuchen zu generieren und zeigt deren Wirksamkeit für die Vorhersage der Bewertungen.

2.3.3 Klassische Lenkgefühl-Objektivierung

Das zugrundeliegende Verfahren ist hier jeweils die statistische Korrelation zwischen Subjektivurteilen aus Probandenversuchen und objektiven Kenngrößen, die aus Messungen berechnet wurden.

Harrer (2007) - Characterisation of Steering Feel

Die größte bisher veröffentlichte Probandenstudie zum Thema Objektivierung von Lenkgefühl findet sich in der Arbeit von [Harrer \[2007\]](#).

Darin wird zur Korrelation eine lineare Regressionsanalyse mit maximal zwei unabhängigen Variablen verwendet. Da die Zahl der Versuchsdurchführungen, also der Stichproben, begrenzt ist, bietet sich hier trotz der umfangreichen Probandenversuche keine Multi-Regression mit mehr als zwei unabhängigen Variablen an.

Weiterhin wird der Weave-Test in verschiedenen Fahrzeugklassen als besonders geeignet zur Untersuchung des Lenkgefühls identifiziert.

Die Ergebnisse zum Mittengefühl ergeben, dass die ISO-Standards erweitert werden müssen, um kleinere Querschleunigungen zu berücksichtigen. Gleichzeitig sei aber auch die Messtechnologie zum Erstellungszeitpunkt der Arbeit an ihrer Grenze, schreibt der Autor. Die Gradienten von Lenkwinkel vs. Handmoment, Querschleunigung vs. Lenkwinkel sowie Gierrate vs. Lenkwinkel, welche aus dem Weave-Test mit kleinen Lenkwinkeln ermittelt wurden, stellten sich als am bedeutendsten für die quantitative Beschreibung des Mittengefühls heraus.

Zschocke (2009) - Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen

Die Objektivierung von Lenkgefühl mithilfe eines Lenkmomentenstellers hat [Zschocke \[2009\]](#) untersucht. Damit können verschiedene Lenkmoment- Varianten bewertet werden. Das Moment wird über einen PID-Regler gestellt, die Regelabweichung beträgt 0,1 Nm bei einer Lenkfrequenz kleiner als 2 Hz und das

Sensorrauschen ist $\pm 0,02$ Nm. Das Modell addiert einen lenkwinkelabhängigen Anteil zum Lenkmoment. Mehrere Probandenversuche bestehend aus Fachleuten und Normalfahrern sowie verschiedene Lenkmoment-Generierungsmodelle werden zur Objektivierung verwendet.

Koch (2010) - Untersuchungen zum Lenkgefühl von Steer-By-Wire Lenksystemen

Steer-By-Wire Lenksysteme eignen sich für die Untersuchung des Lenkgefühls besonders gut, weil hier das Lenkmoment und der Lenkwinkel sauber getrennt werden können. Dies untersuchte Koch [2010] näher im On-Center-Handling, Weave-Test und Transition Test. Dabei wurde die Rückmeldung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts als Schwerpunkt gewählt. Besonders geringere Reibung und Dämpfung wirkten sich positiv auf die Präzision von Lenkwinkleingaben aus. Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Zahnstangenkraftschätzung durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass das Lenkgefühl auf Basis eines modellbasierten Schätzers ein zufriedenstellendes Niveau erreichen kann, aber nicht an die Qualität von Systemen mit gemessenen Kräften herankommt. Der Bewertungskatalog zur Subjektivbeurteilung des Steer-By-Wire-Systems wurde im Wesentlichen an Braess [2001], Heißing und Brandl [2002] und Harrer [2007] angelehnt.

Rothhämel (2011) - A method to find correlations between steering feel and vehicle handling properties using a moving base driving simulator

Um die Zahl abhängiger subjektiver Bewertungskriterien zu reduzieren, führte Rothhämel u. a. [2011] Untersuchungen in einem dynamischen LKW-Simulator mit Variation von Lenkungsparametern durch. Darin wurde weiterhin ein Vergleich zwischen neuronalen Netzen und multipler linearer Regression zur Objektivierung aufgestellt.

2.3.4 Fahrermodellbasierte Objektivierung

Im Unterschied zur klassischen Objektivierung, werden bei dieser Objektivierungsmethode vor allem Closed-Loop Fahrmanöver mit einem Fahrermodell durchgeführt. Die Parameter des Fahrermodells gehen dabei als Kennparameter in die Objektivierung der Subjektivurteile ein.

Henze (2004) - Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells

In dem von [Henze \[2004\]](#) untersuchten Frequenzverhalten des Fahrers wurde ein regelungstechnisches Fahrermodell aus Probandenversuchen am Simulator erstellt. Die Frequenzanalysen ergaben unter anderem, dass bei normaler Kurvenfahrt mit einer Vorsteuerung die Querabweichung und Fahrbahnkrümmung die wichtigsten Fahrerinformationen sind und beim Übergang von der Normalfahrt zu kritischen Fahrsituationen fast nur noch geregelt wird, ohne vorsteuernden Anteil.

Wagner (2003) - Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind

In [Wagner \[2003\]](#) wird der Unterschied zwischen Fahrzeugverhalten und Fahrerbewertungen bzgl. Seitenwind untersucht. Die Bode-Plots von Gierrate vs. Seitenwindintensität sowie Querschleunigung vs. Seitenwindintensität zeigen sich für zwei exemplarische Fahrzeuge sehr ähnlich, während die Fahrerantwort, nämlich der Bode-Plot von Lenkwinkel vs. Seitenwindintensität, die unterschiedlichen Fahrerbewertungen erklärt. Das Handmoment wird also hier vernachlässigt und fließt somit auch nicht beim Fahrermodell ein. Dieses besteht aus acht Parametern, welche mit dem Levenberg-Marquardt-Verfahren identifiziert werden. Die Identifikation wird mit einer Fahrzeugsimulation anstatt mit Messdaten aus einer Realfahrt durchgeführt.

Wolf (2009) - Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen

Die Arbeit von [Wolf \[2009\]](#) deckt auf, dass viele Modelle die Rückmeldung des Lenkmoments an den Fahrer nicht beinhalten. Gleichzeitig wird darin die Signifikanz des Handmoments für das Lenkgefühl gezeigt, so dass die Forderung nach Fahrermodellen mit Handmoment als Eingangsgröße aufkommt.

Schimmel (2010) - Entwicklung eines fahrerbasierten Werkzeugs zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke

Die Ausgangssituation in [Schimmel \[2010\]](#) ist der erweiterte Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis. Dazu wird ein Empfindungsmodell entworfen, das die menschlichen Sinnesorgane modelliert, um Objektiv-Kennwerte auf Empfindungen zu transformieren. Dahinter steckt die Idee, dass jeder Wahrnehmungskanal einen Empfindungsbereich und darin eine bestimmte quantitative Verteilung der

Empfindungen hat, was - technisch interpretiert - einer Sensorkennlinie entspricht. Die Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus [Wolf \[2009\]](#), in denen die Querbeschleunigungsmessung in Kopfnähe ein anderes Zeitverhalten aufweist als im Fahrzeugschwerpunkt.

Außerdem wird ein sogenanntes Lenkradbetätigungsmodell gezeigt, bei dem es sich um eine Art doppelten PID-Regler handelt. Die Vorausschauunkte ([Salvucci und Gray \[2004\]](#)) werden darin geschwindigkeitsabhängig als Vorausschauzeiten modelliert und es gibt Regeltermine für das Lenkmoment, um die Lateral-Regelung zu beeinflussen. Durch einen Vergleich mit aufgezeichneten Lenkdaten aus einem realen Fahrversuch und einer Kombination aus genetischen und gradientenbasierten Optimierungsverfahren werden die Reglerparameter identifiziert. Weiterhin findet ein Parametervergleich bei gleichen Fahrmanövern, aber verschiedenen Fahrzeug-Setups statt. Anschließend wird eine Korrelations- und Regressionsanalyse der Subjektivbewertungen mit den objektiven Lenkmodell-Parametern und den Empfindungskennwerten durchgeführt. Insgesamt werden Fortschritte bei der Vorhersagegenauigkeit von Subjektivnoten mit dem Empfindungsmodell erreicht, allerdings sind keine nennenswerten Ergebnisse zur Objektivierung mit dem Lenkradbetätigungsmodell und dem Handmoment aufgezeigt.

2.3.5 Objektivierung von Störgrößen

Störgrößen, die auf das Fahrzeug wirken, können verschiedenste Ursachen haben. Ein erster Ansatz zur Untergliederung ist, ob es sich um Störgrößen handelt, die von extern oder intern auf das Fahrzeug wirken. Seitenwindstörungen sind externe Kräfte, die auf die Außenhaut des Fahrzeugs wirken und die Kräfte über die Karosserie einerseits an das Fahrwerk weitergeben - und damit auch über die Lenkung das Handmoment beeinflussen - sowie andererseits die Querbeschleunigung und Gierrate an den Fahrersitz weiterleiten. Zu den externen Größen zählen aber auch Reibwertsprünge der Fahrbahn, oder allgemeiner, die Fahrbahnoberfläche und deren Verlauf, insbesondere in z -Richtung.

Zu den internen Störgrößen zählen im Allgemeinen vom Fahrzeug ausgehende Störungen, die zum Beispiel aus Fehlfunktionen resultieren oder vom Fahrer herbeigeführt sind. Die Untersuchung in dieser Arbeit fokussiert sich auf intern applizierte Störgrößen, deren Ursprung in der elektrischen Lenkung ist. Diese Störung pflanzt sich einerseits über die Lenksäule zum Fahrer fort und andererseits über die Zahnstange zur Radaufhängung und damit zur Reifen-seitenkraft, die indirekt die Querbeschleunigung und Gierrate beeinflusst. Ein weiteres Beispiel für eine interne Störgröße ist, wenn der Fahrer kurzzeitig das Lenkrad verreißt, was über den Pfad von der Lenksäule zum Lenksystem die Reifen-seitenkraft beeinflusst und damit ebenso die Bahnführung des Fahrzeugs stört.

Es folgt ein Überblick zu Arbeiten, die sich mit der Objektivierung von Störgrößen im Fahrzeug beschäftigen.

Dettki (2005) - Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen

Um den Geradeauslauf im Closed-Loop zu analysieren, hat [Dettki \[2005\]](#) vom Fahrer unabhängige Kennwerte für die Geradeauslaufgüte ermittelt. Die Störgrößen wirken von außen auf das Fahrzeug ein und sind Seitenwind sowie Fahrbahnneigung. Die Bewertung der Seitenwindempfindlichkeit kommt aus Kennparametern, die aus einer Korrelation von der Störintensität mit dem Giergeschwindigkeitsfehler gewonnen werden. Der Giergeschwindigkeitsfehler ist hier als Differenz zwischen gemessener und simulierter Gierrate aus einem Einspurmodell mit gemessenen Lenkwinkelsignal definiert. Die subjektive Größe ‚Seitenwindempfindlichkeit‘ wird dabei definiert als geringe Kursabweichung bei Störungen, optimales Verhalten um die Lenkradmittenstellung sowie seltene und kleine Lenkkorrekturen in Verbindung mit einer spielfreien und direkt angebundenen Lenkung.

Störgröße Lenkmoment - Sicherheitsbewertung von Lenkgefühl

Bei der subjektiven Auswertung von Störungen, die vom Fahrzeug ausgehen, hat sich eine Skala etabliert, die aus der Kritikalität der Störung von Normalfahrern bemessen wird. Die Kritikalitätsempfindung ist eine subjektive Größe, die in der Emotionswelt des Fahrers während des Fahrmanövers entsteht. Die Ausprägung ist stark abhängig von vergleichbaren Erfahrungen des Fahrers. Anhand des Vergleichs solcher Erfahrungen bewertet der Fahrer das aktuelle Fahrmanöver, indem er sein subjektives Sicherheitsgefühl einschätzt.

Störungsbewertungsskala - Die Störungsbewertungsskala wurde in [Neukum und Krüger \[2003\]](#) vorgestellt und die Eignung für das Sicherheitsempfinden am Beispiel einer Überlagerungslenkung nachgewiesen. Nachfolgend vorgestellte Arbeiten adaptieren diese Skala erfolgreich. Siehe Abbildung 2.9.



Abbildung 2.9: Die Störungsbewertungsskala, angelehnt an [Neukum und Krüger \[2003\]](#)

Schmidt (2006) - Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen

In der Untersuchung von [Schmidt u. a. \[2006\]](#) werden Vertikaldynamikstörungen bei der Fahrzeugquerführung mit der Bewertung des Sicherheitsempfindens in Verbindung gebracht. Dabei wurden, wie in der klassischen Objektivierung gebräuchlich, verschiedene Kennparameter mit den Subjektivnoten der Störungsbewertungsskala korreliert. Allerdings musste ungeklärt bleiben, welche der beteiligten Teilstörungen in welchem Ausmaß in das Bewertungsurteil eingehen. Trotzdem konnte gezeigt werden, dass definierte Unebenheitsanregungen mit den Störungsbewertungen korrelieren.

Schmidt (2008) - Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente

Die Objektivierung der Bewertungen von Zusatzmomenten in elektromechanischen Lenkungen wurde von [Schmidt \[2008\]](#) untersucht. Die Versuchsspanne reichte von Fahrsimulatorversuchen über Realfahrzeuge verschiedener Fahrzeugklassen bis zu einer breiten Variation von Zusatzmomenten. So wurden verschiedene Lenkmoment-Variationen aufgeschaltet und es zeigte sich, dass die Bewertungen nicht unmittelbar mit diesen in Zusammenhang stehen. Als beste Schätzung für die Bewertungen wurden laterale Zustandsgrößen identifiziert. Dieses Ergebnis deckte sich mit der Fahrsimulatorstudie, bei der sich herausstellte, dass diese nicht zur Validierungs-Bewertung geeignet ist, weil die fehlenden Bewegungssimulationen die Subjektivnoten der Probanden beeinflussen haben.

Zur Verbesserung der Objektivierung schlägt der Autor vor, multifaktorielle Ansätze zu verwenden, um multiple Einflussgrößen zu berücksichtigen.

2.4 Modellierung des Fahrers

Objektivierung von Lenkgefühl kann als die Suche nach einer Abbildungsvorschrift zwischen einem Fahrzeug-Setup und dessen subjektiven Bewertungsnoten interpretiert werden. In diesem Sinne versucht wird versucht, den Fahrer bezüglich seiner Fahrzeugbewertungen zu modellieren. Dazu sind im Folgenden Arbeiten vorgestellt, um eine breite Sichtweise auf die Modellierungsmöglichkeiten zu erhalten.

Kondo (1953) - Richtungsstabilität (wenn Steuerbewegungen hinzukommen)

Eines der ersten Fahrermodelle für Laterralregelung kommt von [Kondo \[1953\]](#) und wurde entworfen, um Seitenwindstörungen im closed-Loop zu simulieren. Abbildung 2.10 zeigt die geometrischen Größen, aus denen die Querabweichung Δy_L mithilfe der Vorausschauentfernung L berechnet wird. In [Willumeit und Jürgensohn \[1997\]](#) wird gezeigt, dass dieses Modell auf drei verschiedene regelungstechnische Arten interpretiert werden kann. Eine davon ist, dass Δy_L als Prädiktion von Δy_0 aufgefasst wird, die Vorausschauzeit mit $T_p = L/v_0$ angesetzt und mit einem P-Regleranteil K der Radlenkwinkel δ_H geregelt wird:

$$\delta_H(s) = K \cdot e^{T_p s} \Delta y_0(s). \quad (2.10)$$

Donges (1992) - Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem

Die Nachbildung der Kognition des Menschen wird in [Donges \[1992\]](#) behandelt. Darin unterteilt der Autor die Aufgaben der Fahrzeugführung in Navigation, Bahnführung und Stabilisierung, angelehnt an eine allgemeine Klassifizierung menschlichen Leistungsverhaltens. In [Donges \[2012\]](#) findet sich eine übersichtliche Zusammenfassung dieses Konzepts. Dort ist das Drei-Ebenen-Modell in einem aktuellen Kontext erläutert, siehe Abbildung 2.11. Erstmals vorgestellt wurde die Idee im linken Teilbild von [Rasmussen \[1983\]](#), zur qualitativen Beschreibung von menschlicher Arbeit für zielgerichtete Tätigkeiten. Das dargestellte linke Teilbild stammt aus [Donges \[1992\]](#) und dient als Zwischenschritt, um von der qualitativen rechten Hälfte zur regelungstechnischen Darstellung in Abbildung 2.12 zu gelangen. Darin wird nach [Donges \[1977\]](#) die Führung und Stabilisierung der Fahraufgabe in zwei Teilmodelle separiert. Das ist zum

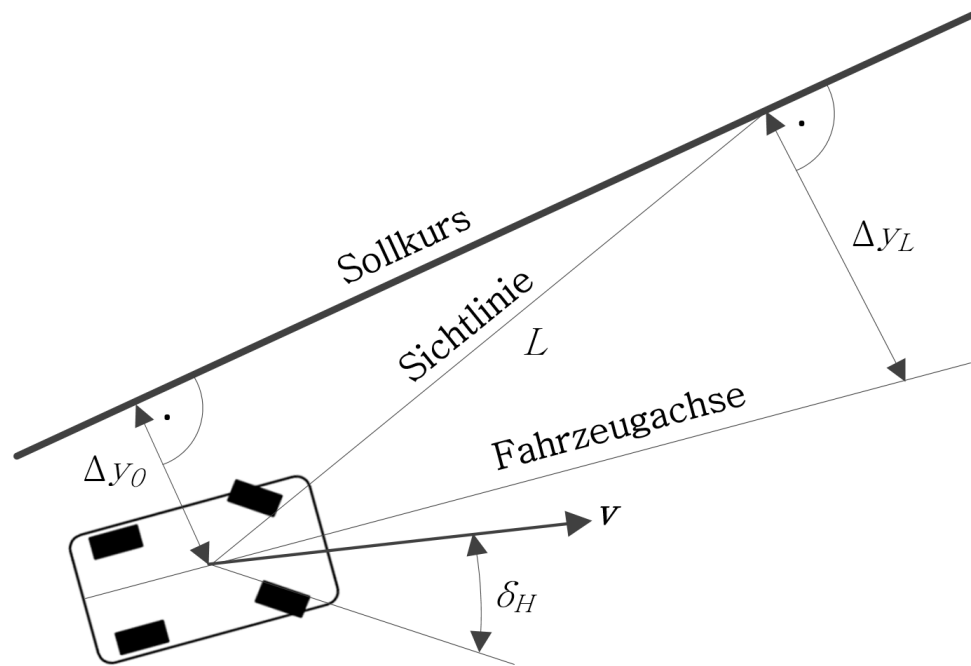


Abbildung 2.10: Geometrische Darstellung der Vorausschaupunkte, angelehnt an Willumeit und Jürgensohn [1997]

einen die „Antizipatorische Steuerung“ und zum anderen die „Kompensatorische Regelung“. Diese Regelungsart entspricht einer Vorsteuerung für die Sollkrümmung der Sollspur und einer Regelschleife für die Stabilisierungsebene, bestehend aus den Gliedern h_1, h_2, h_3 und den Messgrößen Querabweichung, Gierwinkelfehler und Krümmungsdifferenz. Die Regelschleife für die Stabilisierungsebene kann nach Donges [2012] auch als PID-Regler für den Gierwinkelfehler interpretiert werden.

Gies (1998) - Das Lenkgefühl: Merkmale der subjektiven und objektiven Beschreibung

In einer Objektivierungsarbeit über Lenkgefühl betrachten Gies und Marusic [1998] das Fahrzeug als Regelstrecke, die auf Stell- und Störgrößen mit einer Änderung der Regelgrößen reagiert. Um den Gesamtregelkreis auszulegen, zeigen sie die Perspektive auf, das Fahrzeug den Eigenschaften des Fahrers anzupassen. Daraus wird die Aufgabe abgeleitet, den Fahrer und seine sensomotorischen Fähigkeiten nachzubilden, um dessen Übertragungsverhalten aufzustellen und mit diesem Modell den Regler „Fahrzeug“ zu konstruieren.

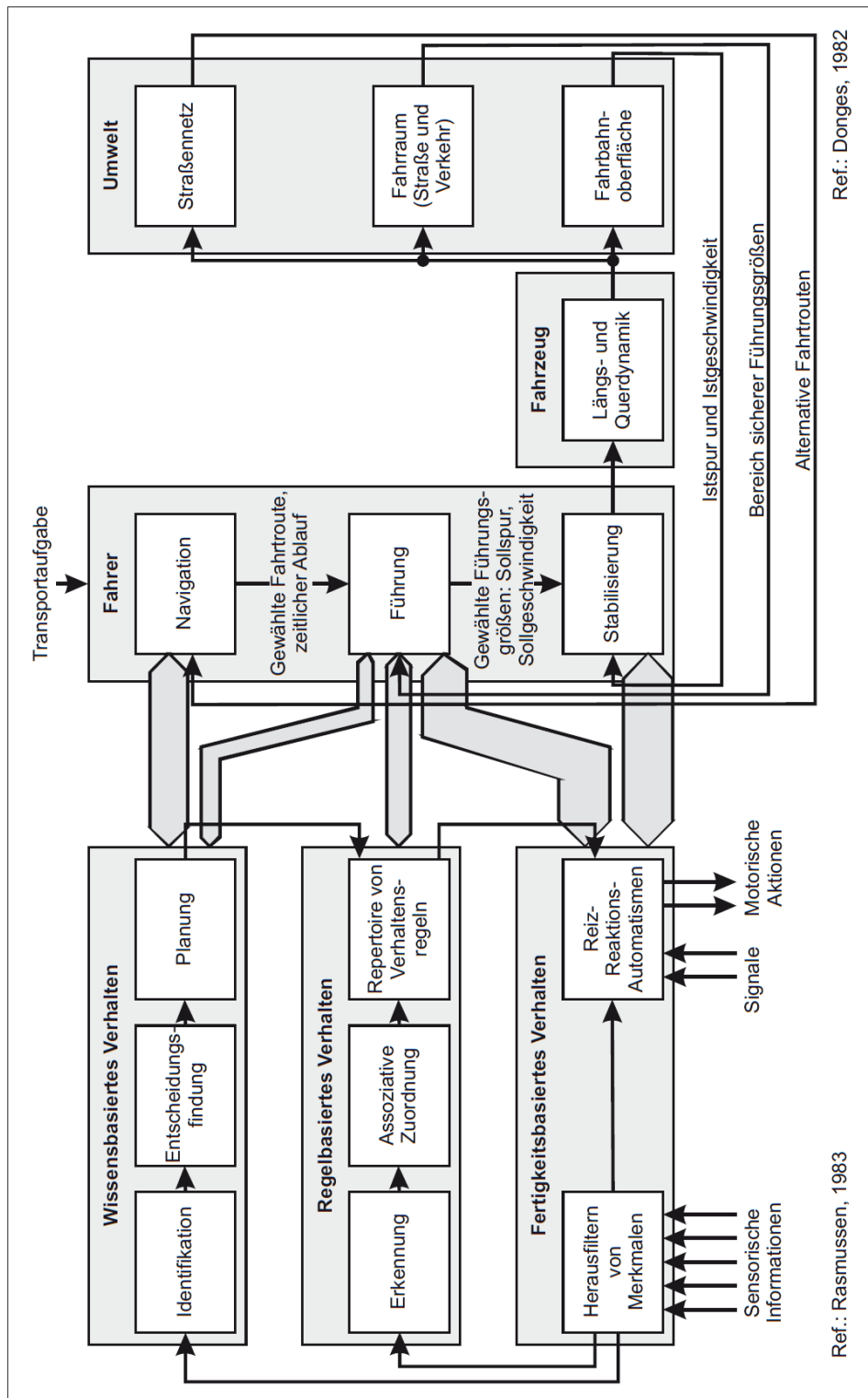


Abbildung 2.11: Drei-Ebenen-Modell aus psychologischer Sicht (rechts) und aus Ingenieurs-Sicht (links), Donges [2012]

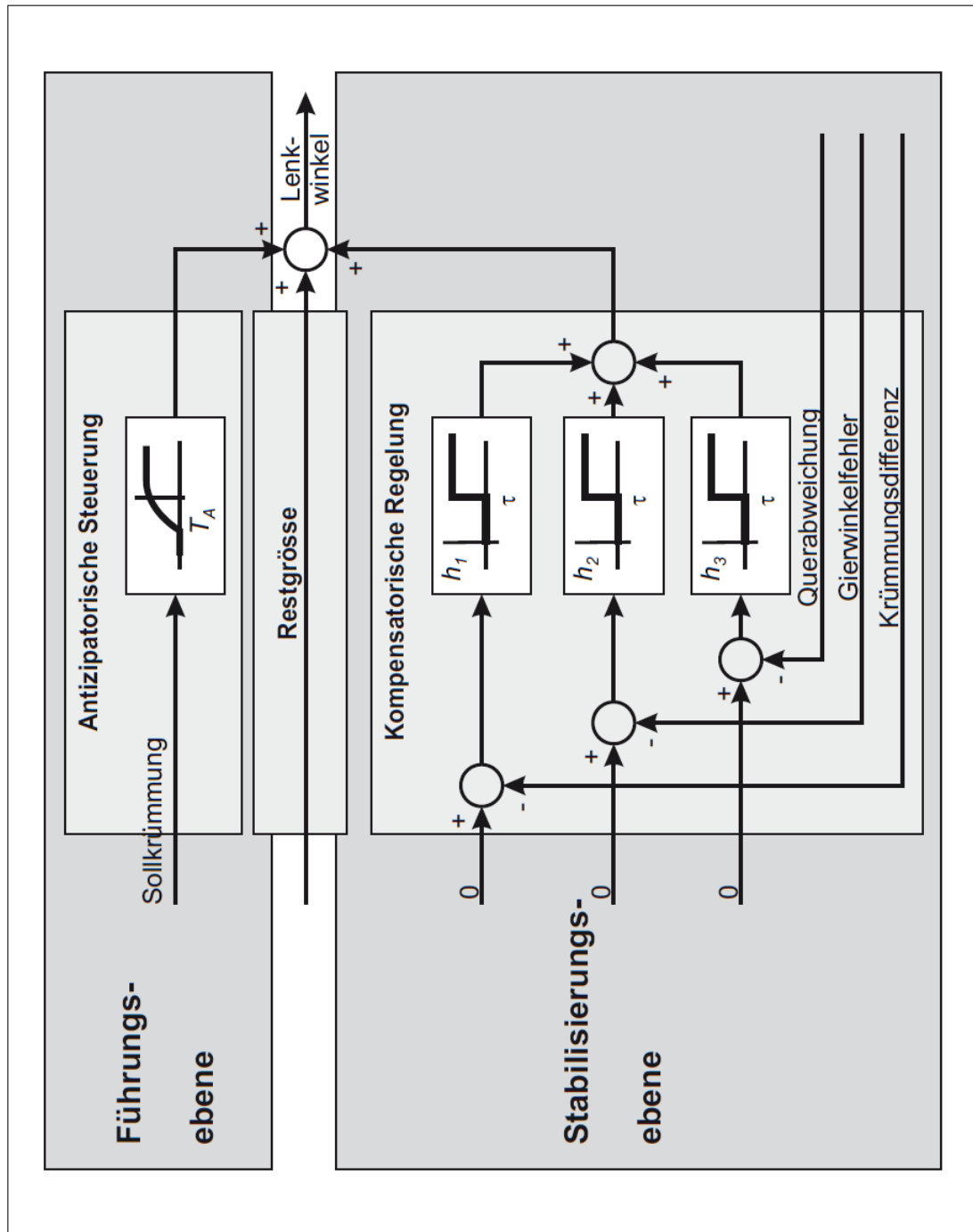


Abbildung 2.12: Regelungsschaltbild des Zwei-Ebenen-Modells, Donges [2012]

Chen (2001) - Identification of a Driver Steering Model and Model Uncertainty from Driving Simulator Data

Um aus experimentell ermittelten Daten ein Fahrermodell zu generieren, werden in der Arbeit von Chen und Ulsoy [2001] Fahrsimulatordaten genutzt.

Daraus werden mithilfe eines Optimierungsalgorithmus die Struktur und Parameter des Unsicherheits-Anteils berechnet. Mit diesem Anteil wird versucht, das zeitlich veränderliche Verhalten von Probanden zu erklären. Dazu wurden 120 min Fahrt der Probanden in 120 äquidistante Einheiten zerlegt und einzeln identifiziert. Aus statistischen Größen wie zum Beispiel Mittelwert und Standardabweichung wurden Variationen in den Zeitabschnitten analysiert. Daraus wird dann wiederum die Unsicherheit intra- und interpersonell modelliert.

MacAdam (2003) - Understanding and modeling the human driver

Notwendige Voraussetzungen zur Fahrermodellierung sind in [MacAdam \[2003\]](#) angegeben. So sind darin unter anderem eine variable Vorausschauzeit wie auch adaptive Fähigkeiten des Fahrermodells essenziell. Weiterhin wird die Verwendung eines internen Fahrzeugmodells empfohlen. Ein Fahrermodell, welches diese Bedingungen erfüllt, ist in [MacAdam \[2001\]](#) angegeben und wird auch in [MacAdam \[2003\]](#) behandelt. So entsteht aus den notwendigen Bedingungen ein nichtlineares Fahrermodell, insbesondere wegen der Kopplung des internen Fahrzeugmodells. Des Weiteren werden visuelle Fahrzeugsignale als die wesentlichen Systemeingänge des Fahrermodells benutzt. Ein Anwendungsbeispiel ist die Simulation mit einem plötzlich platzenden Reifen, welches zeigt, dass das nichtlineare Fahrermodell deutlich realistischere Antizipationsfähigkeiten als das lineare Modell bietet. Hier sei noch einmal angemerkt, dass in der folgenden Arbeit ein besonderes Augenmerk auf nicht dauerhafte Störgrößen gelegt wird und die Identifizierungs-Zeitspanne wie bei den meisten Fahrermodell-Untersuchungen im Bereich von mehreren Sekunden liegt.

Salvucci (2004) - A two-point visual control model of steering

Der Lenkwinkel kann nach [Salvucci und Gray \[2004\]](#) aus den Winkeln zu einem Nahpunkt und einem Fernpunkt bestimmt werden. Der Nahpunkt liegt immer mittig auf der Straße. Der Fernpunkt liegt in Kurven in der Tangente zur Kurveninnenseite, in Geraden jedoch in der Straßenmitte. Der quantitative Zusammenhang ergibt sich aus:

$$\dot{\phi} = k_f \dot{\theta}_f + k_n \dot{\theta}_n + k_I \theta_n. \quad (2.11)$$

Die Lenkwinkelgeschwindigkeit ist darin $\dot{\phi}$, der Winkel zum Nahpunkt θ_n und zum Fernpunkt θ_f . Das entspricht im Wesentlichen einem PI-Regler für den Nahpunkt, kombiniert mit einem P-Regler für den Fernpunkt. Das heißt, der Fahrer lenkt, um Änderungen der Nah- und Fernpunktswinkel zu minimieren.

Plöchl (2007) - Driver models in automobile dynamics application

Eine umfassende Übersicht zu Fahrermodellen ist in [Plöchl und Edelmann \[2007\]](#) zu finden. Diese Arbeit klassifiziert Fahrermodelle aus verschiedensten Perspektiven, von ihrer Anwendung bis zu den Modellierungsansätzen. So wird zwischen Anwendungen mit dem Fokus auf Fahrzeug, Fahrer, der Kombination von beiden und der Umwelt unterschieden. Unter die Kategorie „Kombination von Fahrer und Fahrzeug“ fällt insbesondere die fahrermodellbasierte Objektivierung aus Abschnitt [2.3.4](#).

Wang (2014) - Modeling and Recognizing Driver Behavior Based on Driving Data: A Survey

Für eine aktuelle Übersicht zum Thema Identifizierung von Fahrermodellen empfiehlt sich der Artikel von [Wang u. a. \[2014\]](#). Insbesondere werden darin parametrische, semi-parametrische und nicht-parametrische Verfahren zur Fahrermodellidentifizierung unterschieden. Bei parametrischen Modellen wird die mathematische Struktur vorgegeben und die darin enthaltenen Parameter werden identifiziert, während bei nicht-parametrischen die Modellstruktur identifiziert wird. Zusammenfassend halten die Autoren fest, dass charakteristische Parameter für Fahrverhalten, Fahrausbildung und Fahrzustand des Fahrers von der Fahraufgabe und der Situation abhängen.

2.5 Fahrsimulatoren

Zunächst werden Fahrsimulatoren in statische und dynamische unterteilt, das heißt, mit Bewegungssimulation, bei denen die kinästhetischen Sinne bedient werden und auf der anderen Seite feststehende Simulatoren. Eine weitere Unterteilung geschieht durch die Fahraufgabe. In [Negele \[2007\]](#) werden umfassend verschiedene Fahrsimulatoren untersucht, insbesondere heißt es darin:

„Während die primäre Fahraufgabe, also die Stabilisierung des Fahrzeugs, hauptsächlich durch sensomotorisch geprägte, nicht bewusst beeinflussbare Reaktionen bestimmt wird, ist dem Fahrer bei sekundären und tertiären Nebenaufgaben eine bewusste Einflussnahme auf seine Reaktionen möglich. Werden auf einem Simulator also Fragestellungen der primären Fahraufgabe untersucht, so sind nur geringe Abweichungen der Simulation von der Realität zulässig. Dagegen kann bei der Untersuchung von sekundären und tertiären Aufgabenstellungen, wie sie für den Bereich der Fahrerassistenz und der Mensch-Maschine-Schnittstelle typisch sind, eine Abweichung der Simulation von der Realität zulässig sein“.

Offenbar gehört das Lenkgefühl zu den primären Fahraufgaben und erfordert deshalb einen hohen Grad an kinästhetischer Regelgüte für einen Fahrsimulator

mit Bewegungssimulation. Übliche am Markt verfügbare Systeme zur Bewegungssimulation sind hydraulisch angetrieben, moderne Systeme verfügen über Spindelmotoren mit pneumatischer Unterstützung. Für die in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen wird ein statischer Fahrsimulator zur Bahnführung und Stabilisation genutzt.

In der bereits erwähnten Arbeit von [Eckstein \[2001\]](#) wird ebenfalls ein Fahrsimulator eingesetzt, um das Fahrgefühl mit Side-Sticks im Vergleich zum Lenkrad zu untersuchen. Zur Objektivierung werden Kriterien für die Fahrgüte definiert und daraus sogenannte Leistungsmaße errechnet: Gierwinkelfehler-Leistungsmaß, Querabweichungs-Leistungsmaß und DLC-Leistungsmaß.

In [Fuhr u. a. \[2003\]](#) wird die Notwendigkeit zur Nutzung einer Mischung aus Fahrsimulator, Realfahrten und Simulationen zur Sicherheitsbewertung von mechatronischen Systemen im Fahrzeug bekräftigt. Die Modellierung von Fahrerreaktionen wird dort als offenes Problem bewertet.

2.6 Zusammenfassung

Der vorliegende Stand der Technik zeigt verschiedene Ansätze für die Objektivierung von Lenkgefühl. Der Begriff des Lenkgefühls wird dabei von den Autoren ähnlich, aber in feinen Nuancen definiert, deren Schnittmenge als gemeinsamer Konsens für eine Definition dient und deren Vereinigung als weicher Oberbegriff interpretiert werden sollte. Zu den Ansätzen zählen zum einen insbesondere Open- sowie Closed-Loop Fahrmanöver, die mit Kennparametern aus dem klassischen Lehrgebiet der Fahrzeugtechnik Korrelationen mit den Bewertungen untersuchen. Zum anderen spielen fahrermodellbasierte Objektivierungsansätze eine wichtige Rolle, die entweder Kennparameter aus den Fahrermodellparametern von nachgefahrenen Realfahrten erzeugen oder die die Sollkursverfolgung des Fahrers nachbilden, um Realfahrten ganzheitlich zu simulieren und anschließend mit der klassischen Objektivierungsmethode die Bewertungen vorherzusagen.

Für die Objektivierung von Störgrößen haben sich bei Seitenwindstörungen die Nachbildung des Fahrers und anschließende Objektivierung der Kennparameter bewährt. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Ansatz gewählt, um bei Störgrößen die von der EPS ausgehen, subjektive Kritikalitätsbewertungen vorherzusagen. Dazu wird ein Fahrermodell entworfen, das EPS-Störungen realistisch kompensiert und es wird ein Verfahren zur Generierung von optimalen Kennwerten auf Basis von Zeitreihen entwickelt. Dieses Vorgehen wurde in [Fritzsche \[2015\]](#) erstmals veröffentlicht und in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

Mit diesen Bausteinen können perspektivisch komplexe Testumfänge, die bei einer sicherheitsrelevanten Fahrzeugkomponente von der funktionalen Sicherheit gefordert werden, automatisiert ausgewertet werden.

3 HiL-Lenkungsprüfstand

Das zentrale Werkzeug in dieser Arbeit ist ein mechatronischer Hardware-in-the-Loop (HiL) Lenkungsprüfstand. Dieser hat im Vergleich zu reinen HiL-Prüfständen, auf denen nur Steuergeräte stimuliert werden, eine mechanische Erweiterung. Die elektrischen Motor-Schnittstellen des EPS-Steuergeräts werden nicht über ein Simulationsmodell angeregt, sondern über ein reales Lenkgetriebe mit zugehörigem Elektromotor. Die hierbei entstehende mechanische Schnittstelle mit der Zahnstange wird über einen Linearmotor angetrieben. Das Lenkritzel wird entweder über eine Lenksäule mit Lenkrad von einem menschlichen Fahrer betrieben oder mit einem Lenkroboter. Dadurch können die Motorschnittstellen des Steuergeräts elektrisch gespeist werden, damit ist eine realistische Prüfanlage für die EPS gegeben.

Mit diesem Prüfstand werden für die folgenden Untersuchungen verschiedene Testszenarien realisiert. Dazu gehört der Umbau zum Fahrsimulator, indem der Lenkroboter durch ein Lenkrad mit Fahrersitzplatz ausgetauscht wird, siehe Abbildung 3.1. Zudem wird der Prüfstand für rein virtuelle Versuche ohne den Menschen als Fahrer, aber mit Lenkroboter, betrieben.

3.1 Simulationsmodell

Das Simulationsmodell, das auf dem Prüfstandsrechner läuft, hat die Aufgabe, eine realitätsnahe Zahnstangenkraft zu berechnen sowie die Sichtfeldvisualisierung zu erzeugen.

Zur Berechnung der Zahnstangenkraft liest ein Echtzeitmodell des Gesamtfahrzeugs auf dem Prüfstandsrechner die Zahnstangenposition ein und gibt die berechnete Zahnstangenkraft an den Linearmotor aus. Diese Berechnung wird durch das „ASM Vehicle Dynamics“ Modell der Firma dSpace ausgeführt, eine Beschreibung des Modells und der benötigten Software-Werkzeuge findet sich in [dSpace \[2012c\]](#).

Abbildung 3.2 zeigt schematisch das Simulationsmodell mit den wesentlichen Zustandsgrößen, abgeleitet aus dem Regelkreis 1.1.

Gesamtfahrzeugmodell Die Fahrzeugkinematik wird durch das ASM-Modell berechnet, eine Beschreibung ist in [dSpace \[2012d\]](#) und [dSpace \[2012b\]](#) zu finden. Das Fahrzeugmodell besteht aus einem Mehrkörpersimulationsmodell



Abbildung 3.1: EPS-Fahrsimulator mit HiL-Prüfstand im Hintergrund

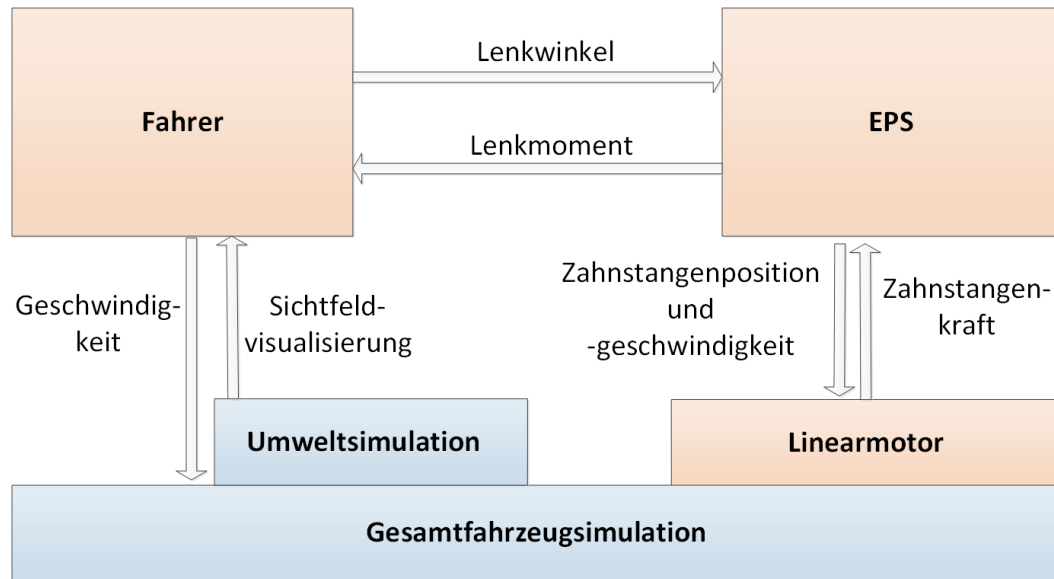


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Simulationsmodells

mit fünf Körpern, zusammengesetzt aus vier Rädern und dem Fahrzeugkörper. Der Fahrzeugkörper besitzt sechs Freiheitsgrade im erdfesten Bezugssystem. Die Radkörper sind über vier Gelenk-Kennlinien an den Fahrzeugkörper gekoppelt und die Lenkung sowie die Drehung der Räder werden als rotatorische Gelenkanbindung modelliert. Mit den daraus entstehenden Gelenkfreiheitsgraden wird die Fahrzeugbewegung als Mehrkörpersystem beschrieben und numerisch gelöst.

Abbildung 3.3 zeigt die zugrundeliegende Modellstruktur, darin sind die Umgebungs- und Fahrdynamikblöcke gezeigt sowie die Schnittstellen zum Steuergerät der realen Lenkung.

Reifenmodell Zur Reifensimulation wird das Modell TMeasy aus [Hirschberg u. a. \[2002\]](#) verwendet. Dieses semi-empirische Modell ist echtzeitfähig und wird mit Reifenprüfstandsdaten parametrisiert. Es modelliert die longitudinalen und lateralen Reifencharakteristiken sowie das Rückstellmoment mittels Längs- und Querschlupf. Die Kennlinien der Längs- und Seitenkräfte werden dabei aus einer gebrochenrationalen, kubischen sowie konstanten Funktion stückweise zusammengesetzt. Die Funktion für das Rückstellmoment wird aus dem Querschlupf mittels eines linearen sowie kubischen Polynoms zusammengesetzt. Diese ressourcensparende Berechnungsmethode prädestiniert das TMeasy-Modell für Echtzeit-Anwendungen. Außerdem besitzt das Modell einen dynamischen Anteil, indem eine Differentialgleichung zweiter Ordnung gelöst wird, welche die Reifendeformation im Latschbereich als Feder-Dämpfer-Element modelliert.

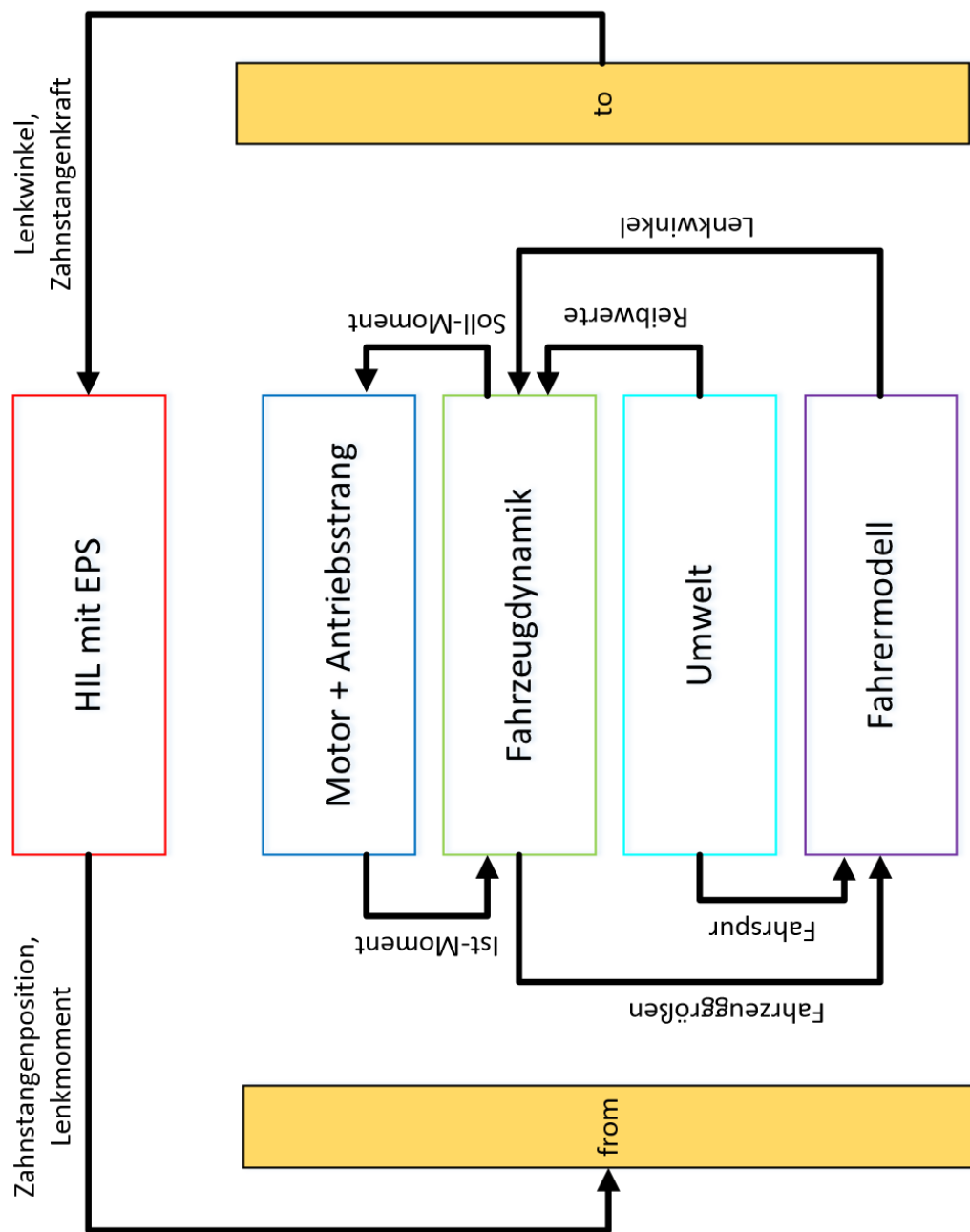


Abbildung 3.3: Struktur der Simulationsmodells, angelehnt an Patil [2013]

Mithilfe der gelösten Freiheitsgrade des Gesamtfahrzeugmodells werden die Reifenkräfte berechnet und daraus wiederum die Spurstangenkräfte. Da der Linearmotor die Zahnstange nur einseitig antreibt, werden die berechnete linke und rechte Spurstangenkraft aufsummiert und an den Linearmotor als Sollkraft ausgegeben.

Fahrermodell Die Simulationsumgebung ASM verfügt auch über ein Fahrermodell, mit dem vordefinierte laterale und longitudinale Fahraufgaben durchgeführt werden können. Für die von Probanden durchgeführten Fahrmanöver in Kapitel 4, wird der lateral wirkende Teil des Fahrermodells in Kapitel 6 verwendet, um die für die Störgrößenaufschaltung notwendigen Fahrmanöver anzufahren.

Die laterale Funktion des Fahrermodells untergliedert sich in zwei verschiedene Reglermodelle, von denen der Eine besonders für dynamische Fahrspurverfolgung geeignet ist und der Andere für genaue stationäre Fahrsituationen wie beispielsweise eine Kreisfahrt. Letzteres basiert auf dem Fahrermodell aus [Sharp und Casanova \[2000\]](#) und wird im Laufe der Arbeit, insbesondere in Abschnitt 6.2.2 Verwendung finden. Dieses nichtlineare Modell basiert auf der linearen, optimalen, diskreten, vorausschauenden Regeltheorie und verwendet mehrere Vorausschaupunkte zu Regelung des Lenkwinkels, [dSpace \[2012a\]](#).

3.2 EPS-Fahrsimulator mit realem Fahrer

Um Realfahrt und Fahrsimulator im nächsten Kapitel vergleichen zu können, wird dieser zunächst vorgestellt. Der Vergleich bezieht sich auf die Kritikalität der Störgrößenaufschaltung. Da der Mensch das Lenkmoment hochgradig sensibel wahrnimmt ([Wolf \[2009\]](#)), sollte der Reproduktion des Lenkmoments am Fahrsimulator viel Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Wenn das Lenkmoment über einen Direktantrieb hinter dem Lenkrad gestellt wird, ist deshalb eine sehr hohe Regelgüte erforderlich, weil diese das Lenkgefühl direkt beeinflusst.

In der vorliegenden Arbeit wird das Lenkgefühl durch eine reale EPS dargestellt, welche indirekt über einen Zahnstangenaktuator beeinflusst wird. Daraus ergeben sich die folgenden beiden Vorteile:

Erstens muss die EPS nicht im Rahmen der Gesamtfahrzeugsimulation simuliert werden und kann als realer Prüfling im Fahrsimulator betrieben werden, um EPS-spezifische Eigenschaften zu untersuchen.

Zweitens ist die Anforderung an die Regelgüte des Zahnstangenaktuators geringer als bei einem Direktantrieb am Lenkrad, weil die EPS als Dämpfungsglied auf den Fahrer wirkt. Der Autor in [Negele \[2007\]](#) schreibt dazu: „Nur wenn das Lenkgetriebe und die Lenkungs kinematik mit ihren charakteristischen Elastizitäten verbaut sind, kann sich eine Verbesserung der Simulationsgüte ergeben.“

Aufbau des Fahrsimulators Der Fahrsimulator, der für die folgenden Untersuchungen benutzt wurde, besteht im Wesentlichen aus einem Linearmotor, einer realen EPS mit Lenksäule und Lenkrad sowie dem Fahrersitzplatz, aufgebaut aus Fahrersitz und Sichtfeldvisualisierung. Abbildung 3.4 zeigt den schematischen Aufbau des EPS-Fahrsimulators. Die Zahnstange der EPS ist mit dem Linearmotor verbunden, so dass mit dem Linearmotor die berechneten Zahnstangenkräfte aus einer Gesamtfahrzeugsimulation eingeregelt werden können. Der Linearmotor wird kraftgeregelt betrieben und erzeugt damit ein Lenkmoment am Lenkrad, welches der Fahrer als Handmoment wahrnimmt.

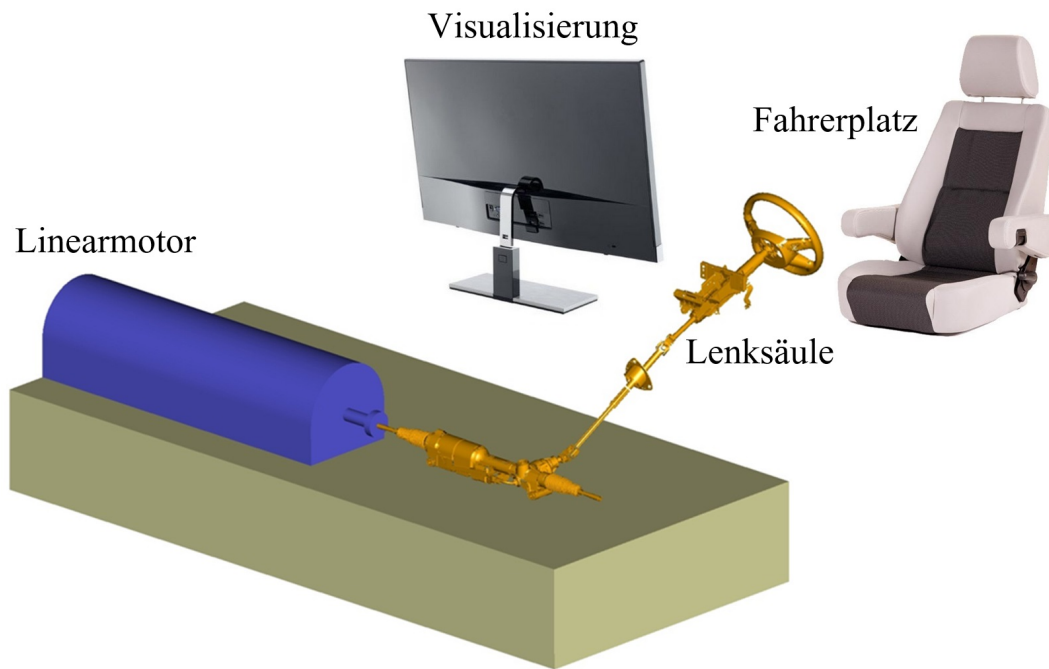


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des EPS-Fahrsimulators

Der Linearmotor des Prüfstands ist für eine Maximalkraft von 20 kN ausgelegt und beherrscht statische sowie dynamische Regelmodi für die Soll-Zahnstangenkraft. Die Toleranz der Zahnstangenkraftmessung liegt mit einem Messbereich von ± 25 kN bei 0,1 %. Die Position des Sekundärteils, und damit die der fest verbundenen Zahnstange, ist auf $3 \mu\text{m}$ genau messbar. Die hochdynamischen Eigenschaften des Linearmotors in Verbindung mit dem Umrichter und der Messtechnik prädestinieren den Prüfstand für eine potentiell realitätsnahe Wiedergabe des Lenkgefühls.

3.3 EPS-Fahrsimulator mit virtuellem Fahrer

Der HIL-Lenkungsprüfstand ist so ausgelegt, dass - mit wenigen Handgriffen - anstelle der Lenksäule ein Lenkroboter eingerüstet werden kann. Mit diesem Lenkroboter können Lenkmoment oder Lenkwinkel eingeregelt werden. Damit ist es möglich, den Prüfstand inklusive der realen EPS mit einem virtuellen Fahrermodell anstelle eines menschlichen Fahrers zu betreiben. Dem Fahrermodell stehen damit die gleichen haptischen Rückmeldungen aus der Lenkung zur Verfügung wie auch einem menschlichen Fahrer am Lenkrad.

3.4 Validierung

Die Gesamtfahrzeugsimulation wurde auf das in den Probandenversuchen verwendete Fahrzeug parametrisiert. In der folgenden Validierung wurde das Simulationsmodell insbesondere auf die Genauigkeit während der stationären Kreisfahrt untersucht. Dafür wurde mit dem realen Fahrzeug und menschlichen Fahrer eine Messfahrt durchgeführt, um fahrdynamisch relevante Fahrzeuggrößen aufzuzeichnen. Dazu gehören insbesondere Lenkwinkel, Querbesehleunigung und Gierrate. Weiterhin ist für den validen Betrieb des EPS-Fahrsimulators die Zahnstangenkraft eine bedeutende Größe, während der Lenkwinkel vom Lenkroboter mit der Trajektorie aus der Messfahrt gesteuert wird.

Die Abbildung 3.5 zeigt die Validierungsergebnisse der genannten Fahrzeuggrößen bei einer Kurvenfahrt im Zeitraum $-6\text{ s} < t < 6\text{ s}$ und belegt eine quantitativ gute Simulation. Zum Zeitpunkt $t = 0\text{ s}$ wurde ein zusätzlicher Lenkimpuls für 100 ms in Richtung der Kurvenaußenseite aufgeschaltet, was in der Messung und Simulation deutlich zu sehen ist. Zum Zeitpunkt der aufgeschalteten Störgröße wird allerdings der stationäre, lineare Bereich kurzzeitig verlassen, was zu einer quantitativen Differenz in den Validierungsgraphen führt. Da der Fahrsimulator insbesondere den Zweck verfolgt die Kritikalität widerzuspiegeln, bestimmen die Ergebnisse aus dem Kapitel 4 letztendlich die qualitative Validierung.

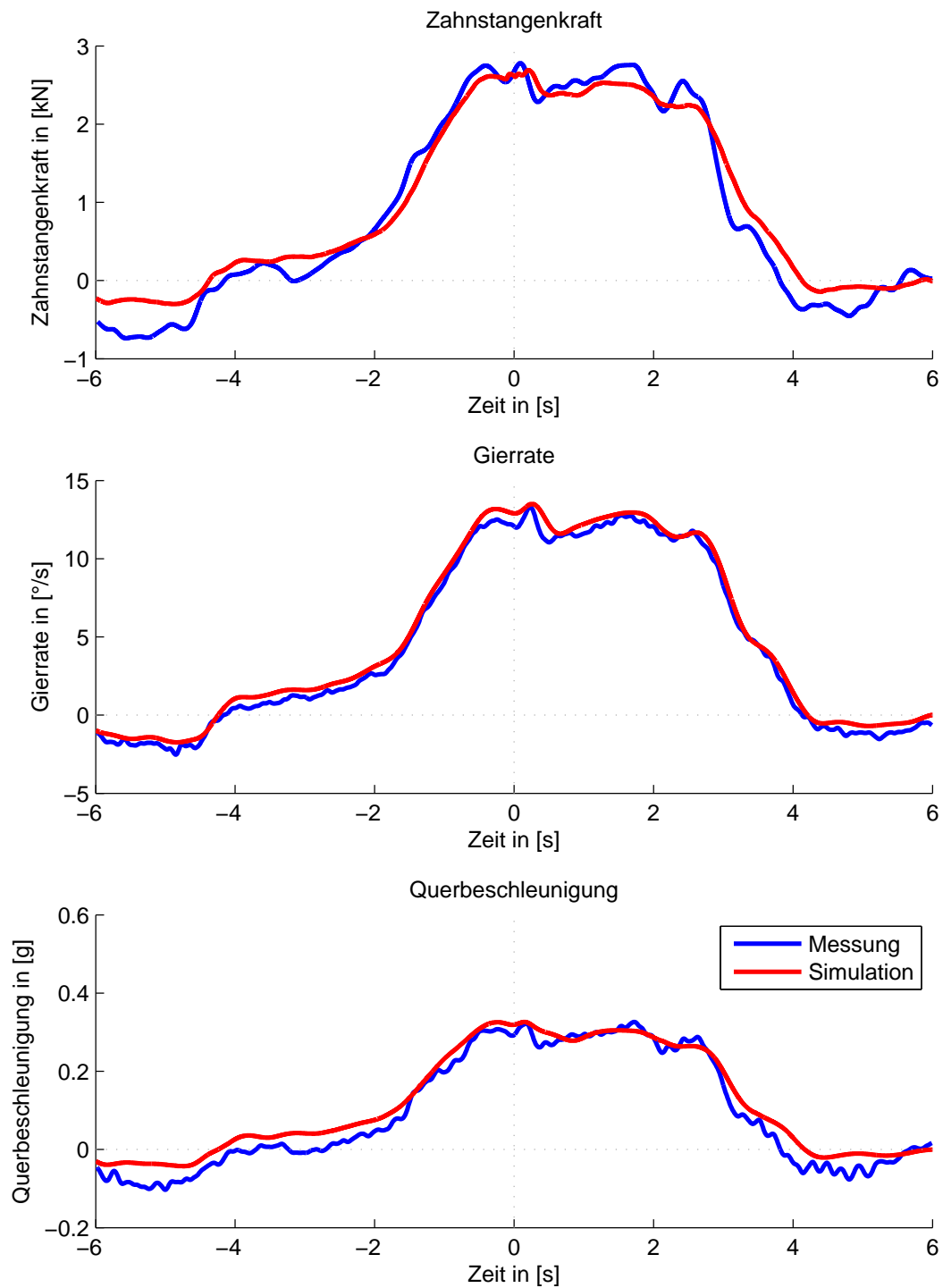


Abbildung 3.5: Validierung der Simulation für eine Kurvenfahrt mit der Störgröße Zusatzlenkimpuls zum Zeitpunkt $t = 0$

4 Die Probandenversuche

Die Probandenversuche sind ein wichtiges Instrument für die Freigabe der Entwicklung eines neuen Lenksystems. Anhand der Ergebnisse werden die in der Entwicklung der Lenksysteme propagierten Momentengrenzen validiert.

Dazu wird den Probanden eine breite Palette an Störgrößen präsentiert, um diese hinsichtlich ihrer Kritikalität zu bewerten. Die Fahrversuche sind so ausgelegt, dass realitätsnahe Fahrsituationen nachgestellt werden, bei denen die Störung für den Proband unerwartet auftritt. Eine sorgfältige Heranführung der Probanden an das Fahrzeug und die Versuche ist notwendig, um die Umgebung und das Fahrzeug vertraut zu machen, damit eine valide Bewertung abgegeben werden kann.

In diesem und allen nachfolgenden Kapiteln wird ein gelber Blitz in den Abbildungen verwendet, um die Präsenz der Störgröße zu veranschaulichen. Dieser Blitz kann entweder eine lokale Position oder einen Zeitpunkt markieren und ist zum Beispiel in Abbildung 4.2 dargestellt.

4.1 Das Versuchsfahrzeug

Für die Versuche wurde ein Prototypen-Fahrzeug Audi Q7 aus dem Jahr 2014 verwendet und mit Messtechnik ausgestattet. Dieser ist mit einer EPS mit entsprechend hoher Leistungsklasse ausgestattet. Als Messtechnik wurde insbesondere ein Messlenkrad zur Lenkmomentmessung in einem weiten Momentenbereich verbaut, sowie Spurstangenkraftsensoren, um das Fahrzeugmodell zu validieren. Zusätzlich sind je ein inertiales Navigationssystem (Inertial Measurement Unit - IMU) mit einem Datenlogger in der Mittelkonsole und an einem Messband angebracht. Letzteres hat der Proband am Kopf getragen. Dieser Datenlogger hat die Dreiachs-Beschleunigung, Dreiachs-Drehrate sowie den künstlichen Horizont während der Versuche aufgezeichnet. Abbildung 4.1 zeigt das verwendete Messband.

Diverse EPS- und Fahrzeugsignale werden bei den Versuchen über den Fahrzeugbus in höchstmöglicher Datenrate aufgezeichnet, dazu zählen insbesondere Gierrate sowie Beschleunigung in mehreren Raumachsen, Lenkwinkel, Lenkmoment, Zahnstangenkraft, Fahrzeuggeschwindigkeit und GPS-Positionsdaten.

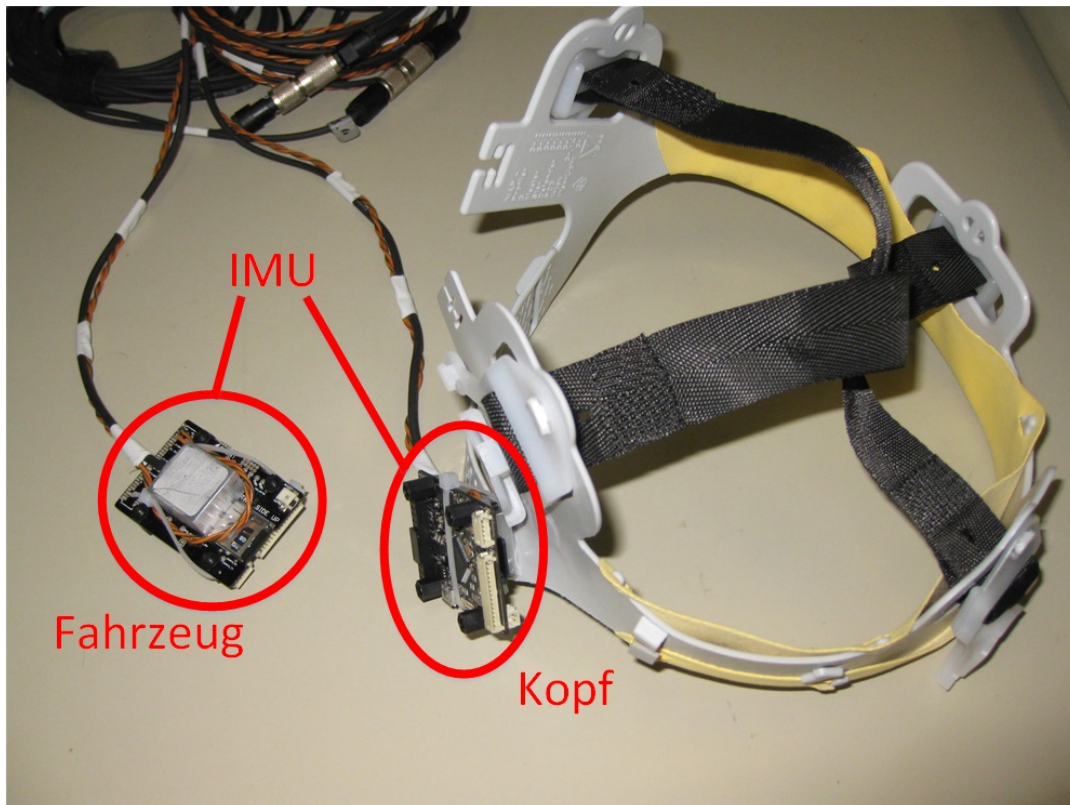


Abbildung 4.1: Messdatenerfassung am Kopf des Probanden sowie fahrzeugfest mit einem inertialen Navigationssystem

4.2 Probanden

Bei der Auswahl der Probanden galt der Grundsatz, eine möglichst repräsentative Stichprobe aus der Bevölkerung mit Führerscheinbesitz zu ziehen. Es wurden nur Normalfahrer ohne fahrdynamische Sonderschulung zugelassen. Ebenso wurde ein Gleichanteil von Männern und Frauen angestrebt und eine breite Aufstellung über alle Altersklassen hinweg realisiert.

Vor Fahrtantritt wurde von den Probanden ein Fragebogen (Anhang A) ausgefüllt, um Ausprägungen vielschichtig zu erfassen.

4.3 Fahrmanöver

Die Fahrmanöver wurden auf dem VW-AG Prüfgelände in Ehra auf einem Handlingkurs abgehalten. Als Fahrmanöver wurden die Geradeausfahrt, die Kreisfahrt und der Slalom durchgeführt. Um die Spur der Fahrmanöver zu kennzeichnen, wurden Leitkegel eingesetzt. Ein Abkommen von der Fahrbahn wurde somit durch Überfahren eines Leitkegels erkannt.

Bei der Geradeausfahrt wurde eine Spurbreite von drei Metern verwendet. Die Geschwindigkeit variierte zwischen 30 km/h und 100 km/h, dargestellt in Abbildung 4.2.

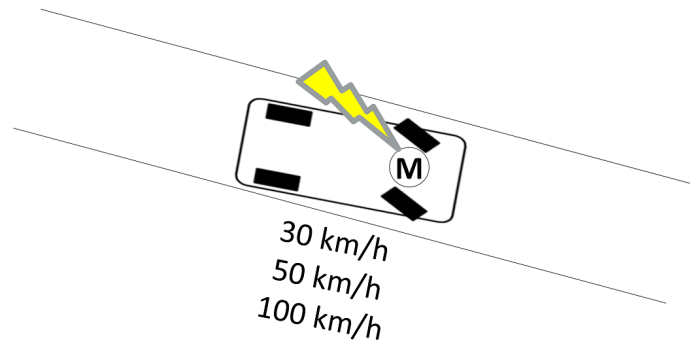


Abbildung 4.2: Geradeausfahrt

Die Kreisfahrt wurde mit den zwei Geschwindigkeiten 30 km/h und 50 km/h gefahren. Die Fahrbahnbreite betrug dabei ebenfalls drei Meter, dargestellt in Abbildung 4.3.

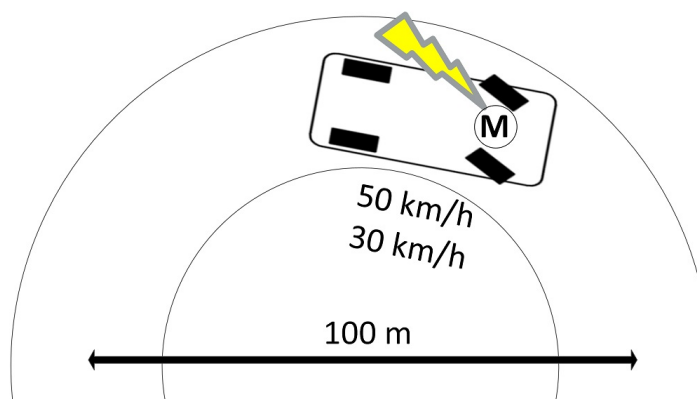


Abbildung 4.3: Kreisfahrt

Der Slalomkurs wurde mit 11 Leitkegeln in einem Abstand von 15 m zueinander markiert und einer Ein- und Ausfahrt durch ein Tor. Das Fahrmanöver wurde dabei mit einer Zielgeschwindigkeit zwischen 35 km/h und 40 km/h durchgeführt. Der Slalomkurs ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Darüber hinaus wurde noch das Manöver des einfachen Spurwechsels mit 50 km/h gefahren.

Im Anhang B befindet sich der Fahrmanöverkatalog, welcher die Variationen und Zusatzmomente auflistet.

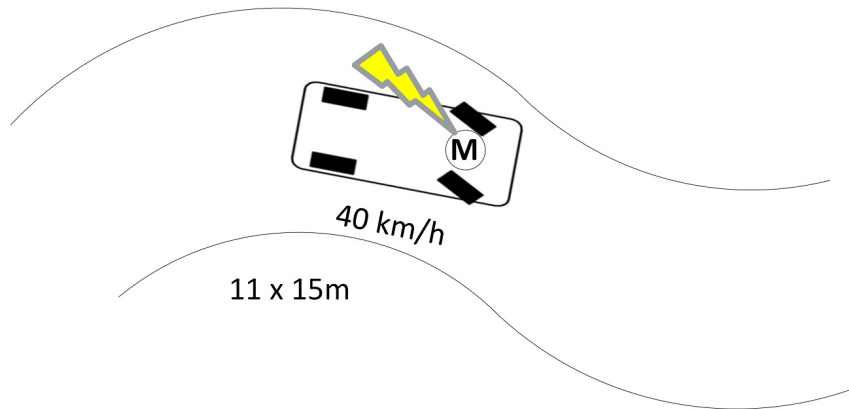


Abbildung 4.4: Slalomfahrt

4.4 Störaufschaltungen

Im Steuergerät der EPS wurde die Störgröße zusätzlich zur Lenkunterstützung ausgegeben. Dieses Zusatzmoment überlagerte das Unterstützungsmoment und hat je nach Wahl zu verschiedenen Sollmomenten geführt, wie in [Abbildung 4.5](#) dargestellt. Durch die Variation von Amplitude und Dauer des Zusatzmoments resultierten verschiedene Störungsbilder für den Fahrer, die von ihm unterschiedlich bewertet wurden. Die Zusatzmomentvariationen sind eine Variation aus Amplitude und Dauer, wobei bei der Amplitude auch negative Vorzeichen auftreten, welche einem Zusatzmoment entgegen der Lenkrichtung entsprechen. Störgrößen werden mit der folgenden linearen Vorschrift erzeugt:

$$M_{\text{pst}} = a_{\text{fac}} M_{\text{pre}} + b_{\text{off}}. \quad (4.1)$$

Das Motorsollmoment M_{pre} wird vom Steuergerät berechnet und mit der Störgröße überlagert. Diese entsteht, indem M_{pre} linear manipuliert wird, sodass a_{fac} auf einen Wert ungleich eins oder b_{off} auf ungleich null gesetzt wird. Die Zeitdauer dieser Manipulation ist frei wählbar und reicht in den durchgeführten Versuchen von 20 ms bis 10 s. Daraus ergibt sich das am Elektromotor gestellte resultierende Moment M_{pst} .

Hier sei noch einmal angemerkt, dass das Vorzeichen des Zusatzmoments für die Fahrzeugreaktionsgrößen und den Fahrer eine hohe qualitative Bedeutung hat, [Schmidt \[2008\]](#). Dort heißt es, dass Aufschaltungen in Richtung Kurvenaußenseite stärkere Fahrer- und Fahrzeugreaktionen hervorrufen. Zum einen verschiebt sich der Betriebspunkt des Fahrzeugs entweder in Richtung Grenzbereich oder davon weg, sodass Nichtlinearitäten auftreten können, wenn der Grenzbereich des Reifens erreicht wird. Zum anderen wird der Fahrer entweder

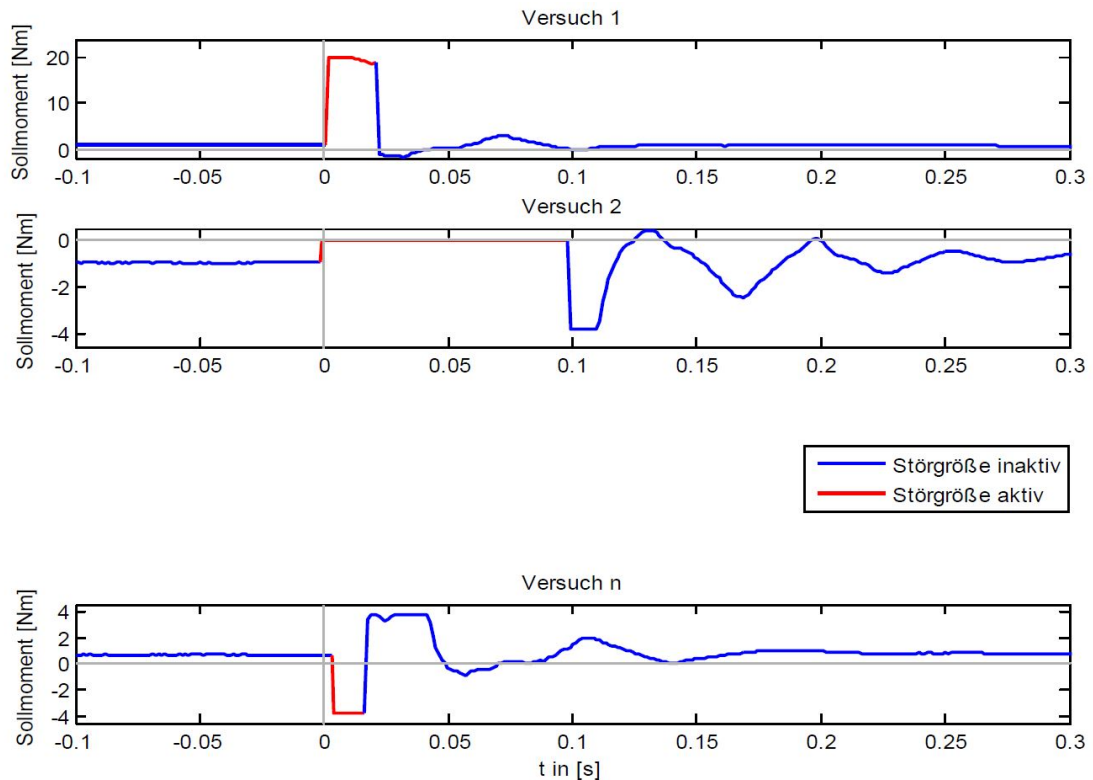


Abbildung 4.5: Zusatzmoment-Variationen

ins Kurveninnere oder zur Geradeausfahrt hin unterstützt.

Des Weiteren werden in einigen Tests Störungen aufgeschaltet, die aus wiederholenden Impulsen bestehen, mit definierter Amplitude und Periode.

4.5 Durchführung

Die Probanden wurden angewiesen, das Fahrmanöver so durchzuführen, als würden sie am normalen Straßenverkehr teilnehmen. Die Bewertungen der Fahrttests wurden unmittelbar nach dem Ende des Manövers vom Probanden abgefragt.

Die Teilnehmer wurden vor Fahrtantritt mit der Störungsbewertungsskala aus Abbildung 4.6 nach [Neukum und Krüger \[2003\]](#) vertraut gemacht.

Einweisung in die Störungsbewertungsskala

Für die Bewertung wurde dem Probanden zuerst eine zweiteilige Einstufung vorgeschlagen, ob die Störung bemerkt wurde oder nicht.

Urteil	Bereich
0	Unbemerkt
1	Bemerkt
2	
3	
4	Störend
5	
6	
7	Gefährlich
8	
9	
10	Nicht beherrschbar

Abbildung 4.6: Störungsbewertungsskala

Die Störung galt als bemerkt, wenn sie wahrgenommen wurde, aber die Auswirkungen auf die Fahraufgabe nur gering waren und kein oder nur leichtes kompensatorisches Handeln notwendig war.

Die Störung galt als störend, wenn die Spurabweichungen und Fahrzeugreaktionen ein deutliches kompensatorisches Handeln des Fahrers erforderten, der Aufwand aber als noch vertretbar eingeschätzt wurde.

Die Störung galt als gefährlich, wenn der aus der Störung resultierende Fehler einen sehr hohen Aufwand zur Kompensation bedingt und eine sicherheitskritische Situation entstand.

Die Störung galt als nicht beherrschbar, wenn das Fahrzeug nicht mehr beherrschbar war und eine sicherheitskritische Situation entstand.

Vor der Durchführung der Fahrversuche fand eine ausführliche Instruktion der Störungsbewertungsskala an die Fahrer statt. Ein wichtiger Punkt war hierbei die Aufforderung, die Störung mit einer kritischen Urteilsthaltung zu betrachten und auf reale Verkehrssituationen zu beziehen.

Im Anhang C ist eine Checkliste zum Versuchsablauf gezeigt, die während der Probandenversuche zur Anwendung kam.

Effekte in der Reihenfolge der Bewertungen

Sind die subjektiven Bewertungen abhängig von der Reihenfolge? In [Krüger und Neukum \[2001\]](#) heißt es dazu, dass die Korrelation nur dann ein brauchbares Maß darstellt, wenn die Fahrer die gleiche Reihenfolge der Varianten sowohl in fahrdynamischen Größen wie in den Bewertungen einhalten.

Ein analoges Problem ist die von Busemeyer in [Busemeyer und Bruza \[2012\]](#) quantenmechanisch untersuchte Reihenfolge der Fragen „Do you generally think Bill Clinton is honest and trustworthy?“ und „Do you generally think Al Gore is honest and trustworthy?“. Wurde den Befragten die Frage eins zuerst gestellt, erreichte Clinton eine Zustimmung von 53 % und Gore 76 %. Umgekehrt gestellt, erhielten Clinton 59 % und Gore 67 % Zustimmung.

Im Allgemeinen ist in den Versuchen zu erkennen, dass die sogenannten Reihenfolge-Effekte sinken, je mehr Übung die Versuchsteilnehmer zum einen in der Bewertung haben - und zum anderen in der Fertigkeit, das Manöver zu fahren. Die Versuchsreihenfolge wurde daher bei jedem Probanden gleich gehalten, um die schwer erfassbaren Lern-Effekte unter Kontrolle zu bringen. Daraus resultiert, dass nach wenigen Bewertungen und Manöverfahrten die Probanden eingewöhnt sind. Die Versuche wurden so gelegt, dass zuerst Slalomfahrten, dann Kreisfahrten und danach Geradeausfahrten durchgeführt wurden.

4.6 Fahrsimulator

Die Einweisung und Durchführung der Fahrversuche im Fahrsimulator wurde der Fahrt im realen Fahrzeug nachempfunden. Die Fahrabschnitte für die entsprechenden Fahrmanöver wurden zum Einfahren und zur Durchführung der Fahrmanöver auf dem Fahrsimulator nachgestellt, der weitere Ablauf fand wie im realen Fahrzeug statt.

Ein Teil der Probanden nahm vor der Realfahrt an der Fahrsimulatorstudie teil, der andere danach. Dadurch konnte der Einfluß dieser Reihenfolge bestimmt werden. Der Proband sitzt dabei in einem Fahrzeug-Mock-Up, welches einem Fahrzeuginnenraum entspricht. Bei dem Lenkrad handelt es sich um ein Messlenkrad, bei dem das Handmoment wie im Fahrzeug in einem weiten Bereich erfasst wird. Bis auf das Lenkrad ist das Cockpit nicht funktionsfähig, der Proband hat nur die Aufgabe, zu lenken. Die Geschwindigkeit wird vom Fahrzeugmodell geregelt, die Fahrbahn und die Fahrzeuginstrumente werden auf zwei 30" Bildschirmen dargestellt, die auf Höhe der Windschutzscheibe angebracht sind. Wie im realen Fahrzeug sitzt der Versuchsleiter auf dem Platz des Beifahrers und schaltet die Zusatzmomente auf.

Im Fahrsimulator wurde eine Teilmenge der Tests im Realfahrzeug gefahren,

davon wurden 20 Tests pro Proband ausgewertet. Die Bewertungen wurden wieder unmittelbar nach Beendigung des Manövers abgefragt.

4.7 Kennzahlen

Gefahren sind 29 Probanden in der Realfahrt und 28 im Fahrsimulator. Jeder Proband verbrachte etwa 120 min im Fahrzeug und 45 min im Fahrsimulator. Insgesamt fuhr jeder Proband durchschnittlich 38 Versuche im Fahrzeug und 31 im Simulator. Also wurden etwa 80 % des realen Testumfangs auch im Fahrsimulator gefahren. Das heißt, dass die Fahrsimulator-Tests weniger als 50 % der Netto-Zeit benötigt haben, die ein entsprechender Testumfang im Fahrzeug benötigt hätte. Diese Zeitersparnis lässt sich hauptsächlich auf das virtuelle Teststreckendesign zurückführen, weil die Tests unmittelbar nacheinander durchgeführt werden konnten. Die Brutto-Zeitersparnis ist weiterhin noch deutlich größer, weil die Anfahrt zum Testgelände und die entsprechend aufwändigere Terminabsprache entfällt.

Pro Proband wurden etwa 500 MB Messdaten erzeugt, die messtechnische Aufbereitung und der Messdaten-Check erfolgte weitgehend automatisiert und hat den Umfang von etwa 1.500 Zeilen Matlab-Quellcode.

4.8 Vergleich Fahrsimulator und Fahrzeug

Das Fahrzeugmodell in den Fahrsimulator-Versuchen wurde mit Prüfstanddaten des baugleichen Versuchsfahrzeugs Audi Q7 parametrisiert. Das reale Lenksystem des Prüfstands ist ebenfalls baugleich mit dem des Fahrzeugs, so dass ein hohes Maß an Vergleichbarkeit in Bezug auf das Lenkgefühl im engeren Sinne gegeben ist.

Um einen Überblick über den Vergleich der Bewertungen zwischen Fahrsimulator und Realfahrt zu bekommen, sind in Abbildung 4.7 die Differenzen der Bewertungen für die einzelnen Fahrversuche dargestellt, wobei der Minuend die Bewertungen des Fahrsimulators und der Subtrahend die des realen Fahrzeugs sind. Die Fahrversuche sind dabei aufsteigend nach dem Median geordnet.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass sich die Differenzen der Fahrversuche stark ähneln. Bei den Slalomversuchen 25 und 26 (siehe Anhang B) konnte die Versuchsdurchführung keine verlässlichen Daten erzeugen, weil der manuell gewählte Zeitpunkt der Störgrößenaufschaltung bei der periodischen Lenkradbewegung nur ungenau reproduzierbar war. Für die Fahrversuche 1 bis 24 zeigt sich der Trend, dass die Bewertungen im Fahrsimulator durchschnittlich um eine Note höher bewertet wurden. Ein Interpretationsversuch legt nahe, dass

durch die fehlende kinästhetische Rückmeldung im Fahrsimulator, die Konzentration auf das Handmoment die Probandenbewertungen kritischer ausfallen lassen.

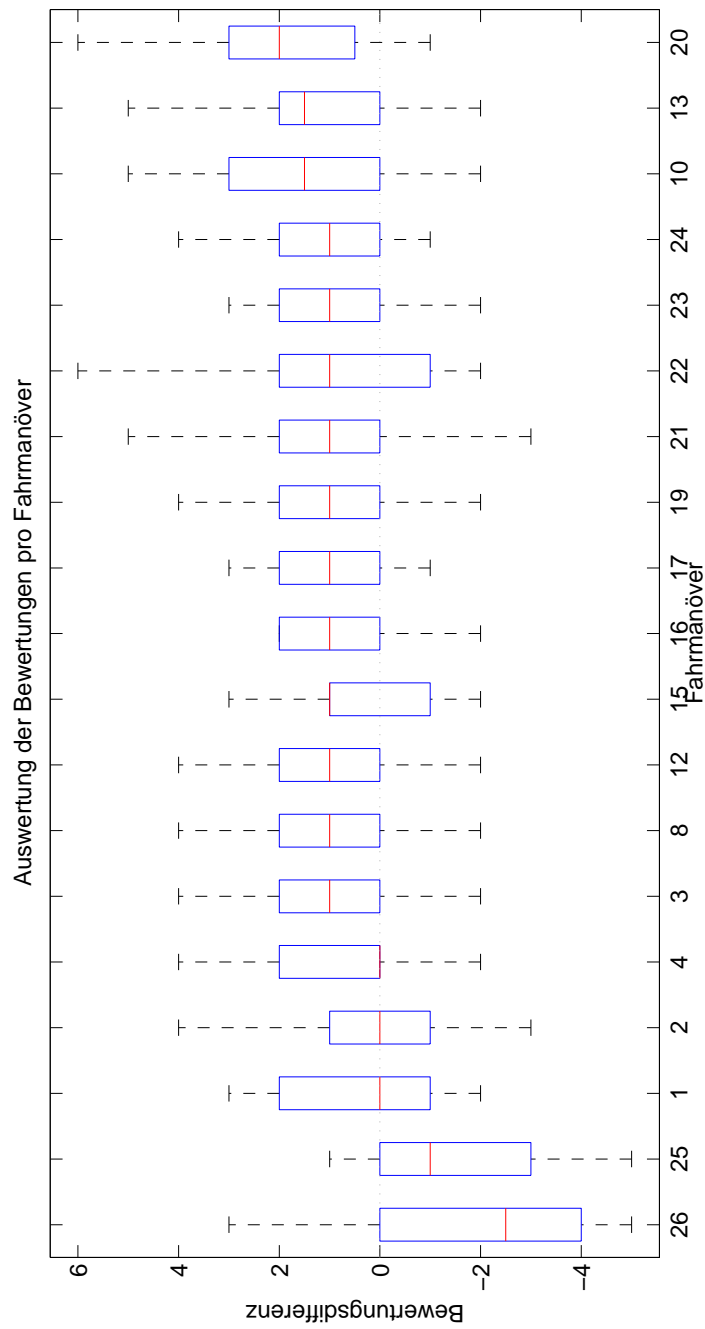


Abbildung 4.7: Boxplot der Bewertungsdifferenzen zwischen Fahrsimulator und realen Fahrzeug, geordnet nach aufsteigendem Median

5 Objektivierung der Kritikalität

Während der Probandenversuche wurden die Zeitreihen der Fahrzeugreaktionsgrößen aufgezeichnet, insbesondere Querbesehleunigung, Gierrate, Lenkmoment und Lenkwinkel. Diesen Aufzeichnungen werden die korrespondierenden Bewertungen gegenübergestellt, um anschließend eine Abbildung zwischen den Zeitreihen eines Versuchs und dessen Bewertung zu konstruieren, siehe Abbildung 5.1.

Einen ersten Blick auf die Bewertungen aller Probanden pro Versuch ist in Abbildung 5.2 gezeigt. Das 50 % Quartil differiert darin um etwa ± 1 Note, der Median ist als roter Balken gekennzeichnet.

5.1 Kennwert-Identifikation

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise gezeigt, wie die aufgezeichneten Fahrzeugsignale aus den Versuchen, nachfolgend Zeitreihen genannt, in ihrer Komplexität reduziert werden. Die hohe Anzahl an Messpunkten für jedes Fahrzeugsignal wird auf wenige Kennwerte heruntergebrochen, die stellvertretend für den Versuch stehen.

5.1.1 Heuristische Kennwertsuche

Eine Möglichkeit, diese Reduktion zu erreichen, ist die Approximation der Zeitreihen mit geeigneten mathematischen Funktionen. In Abbildung 5.3 ist der Verlauf von Querbesehleunigung und Handmoment für einen einzelnen Versuch dargestellt. Daran wird im Folgenden das Prinzip der Kennwertidentifikation exemplarisch gezeigt. Der qualitative Verlauf legt die Verwendung einer bestimmten Funktionenklasse nahe, wie in Abbildung 5.3 oben rechts zu sehen ist. Hier scheint das Handmoment qualitativ ähnlich zu einer exponentiell abklingenden Oszillation zu sein, welche von zwei Exponentialfunktionen eingehüllt wird. Die identifizierten Parameter der Hüllfunktion stehen stellvertretend für den Verlauf des Handmoments in diesem Versuch.

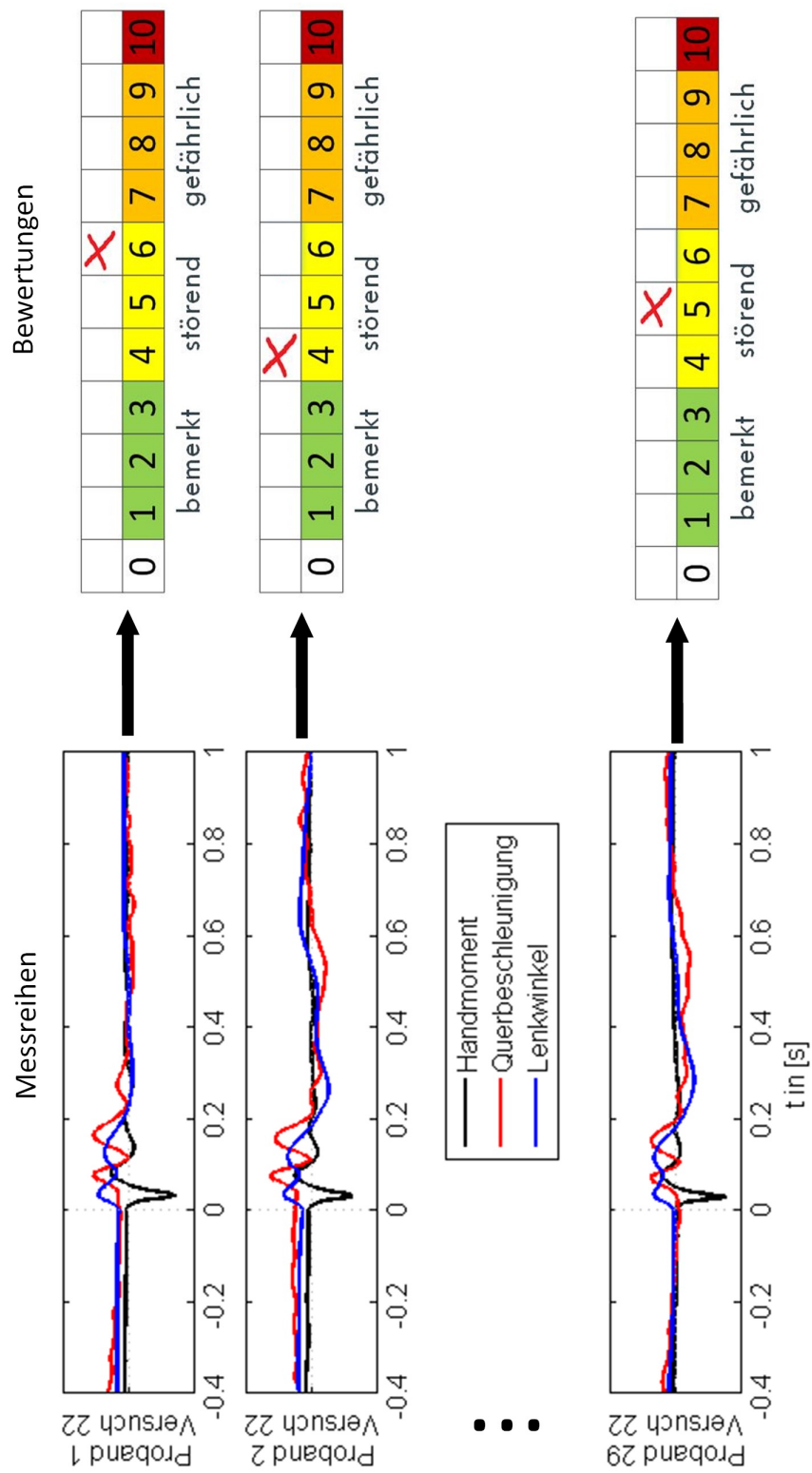


Abbildung 5.1: Versuchsergebnisse

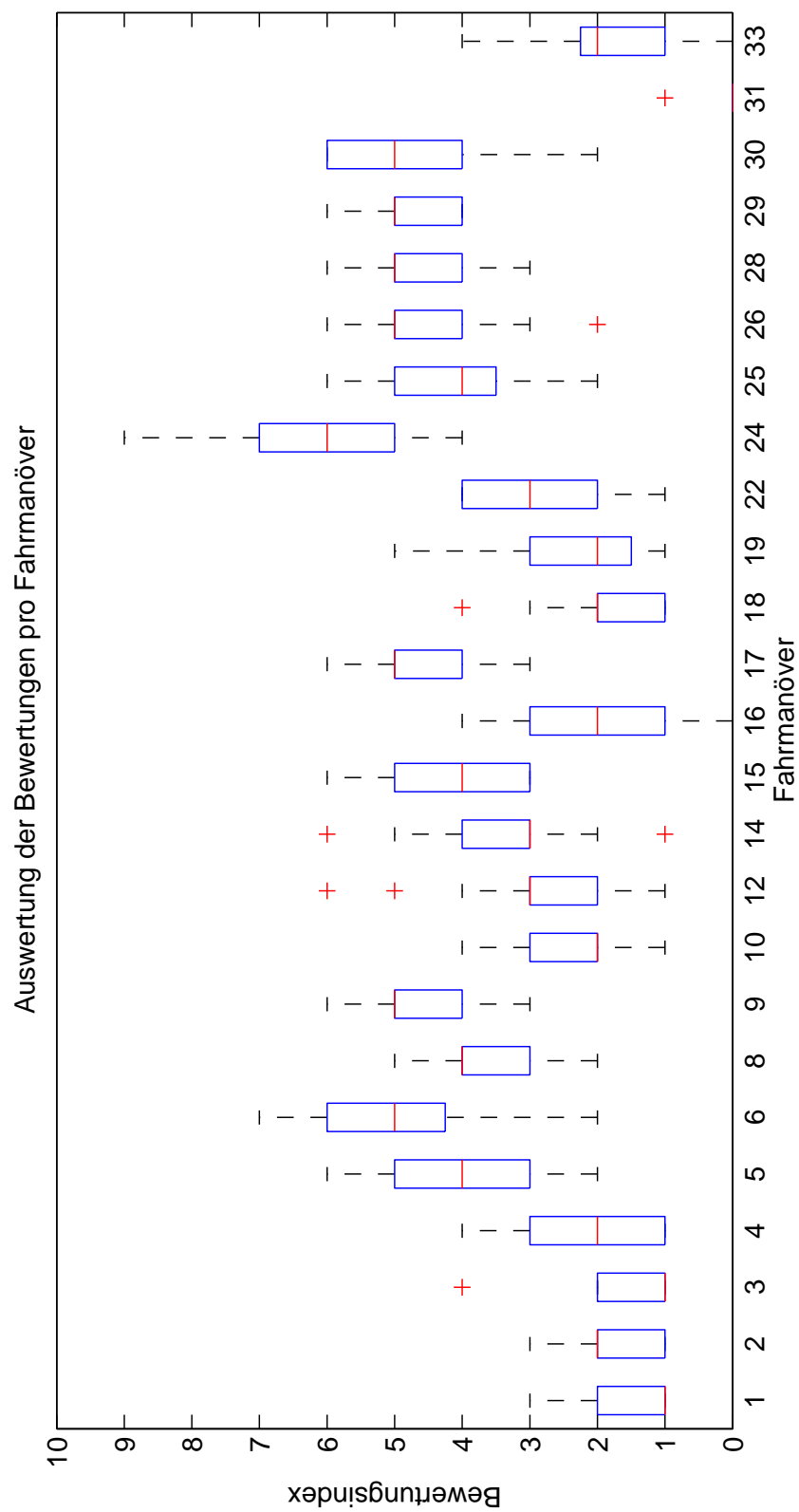


Abbildung 5.2: Streuung der Bewertungen

Äquivalent dazu ist in Abbildung 5.3 unten links die Querbeschleunigung dargestellt, die mit den beiden Funktionen fit1 und fit2 approximiert wird:

$$\begin{aligned} \text{fit1} &= c \cdot e^{-\frac{(t-a)^2}{b}} \cdot \sin(d \cdot (t - e)) \\ \text{fit2} &= c_1 \cdot e^{-\frac{(t-a_1)^2}{b_1}} + c_2 \cdot e^{-\frac{(t-a_2)^2}{b_2}}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Während fit1 aus 5 Parametern besteht, enthält fit2 einen weiteren und approximiert möglicherweise genauer, aber auf Kosten gesteigerter Komplexität. Die Funktionen fit1 und fit2 sind hier exemplarisch ausführlich dargestellt. In der automatisierten Auswertung wird jeder Datenkanal mit einer solchen Methode komprimiert. Dieses Vorgehen reduziert die Zeitreihen der Versuche auf eine deutlich geringere Anzahl an Parametern, die charakteristisch für die Zeitreihen sind. Jeder dieser Parameter wird dann in einem späteren Abschnitt auf Korrelation zu den Subjektivbewertungen untersucht und mit dem Nachfolgenden Verfahren verglichen.

5.1.2 Kennwerte mittels einer Vektorraumnorm

Messsignalverläufe sind Zeitreihen, die einer endlichen Anzahl von Zeitpunkten Messwerte zuordnen. Ein Messsignalverlauf mit n Stützstellen wird in den folgenden Ausführungen als Vektor interpretiert. Die Zeitreihen von m Messkanälen mit jeweils n Messpunkten lassen sich aneinanderreihen und mathematisch als Elemente des \mathbb{R}^{mn} darstellen. Die Menge \mathbb{R}^{mn} ist bezüglich der komponentenweisen Addition und skalaren Multiplikation über dem Körper der reellen Zahlen ein Vektorraum, auch als Standardraum oder Koordinatenraum bezeichnet. Bei einer Bewertungsfahrt wird nun einem Element aus diesem Vektorraum eine Bewertungsnote zugeordnet. Gesucht wird also eine Abbildung F , die ein Element aus diesem Vektorraum, welches einer Messung entspricht, auf einen Skalar abbildet:

$$F: \mathbb{R}^{mn} \rightarrow \mathbb{R} \quad (5.2)$$

Solche Abbildungen von einem Vektorraum in den zugrundeliegenden Körper heißen Funktionale und werden im Folgenden konstruiert. Einfache Vertreter solcher Funktionale sind Vektorraumnormen. Das Beispiel einer Handmomenten-Messung eines Versuchs soll die Anwendung nun verdeutlichen. Die Handmomentmessreihe \mathbf{x}_1 ist ein Element aus \mathbb{R}^n und wird durch eine geeignete mathematische Norm $\|\cdot\|$ auf einen Skalar abgebildet. Geeignet bedeutet, dass die skalaren Werte aus allen Versuchen eine hohe Korrelation mit den Subjektiv-Bewertungen aus den Versuchen aufweisen sollen. Durch einen Vergleich mit den gängigsten Normen wie Maximumsnorm, Euklidische Norm,

Summennorm und p -Norm, hat sich die Euklidische Norm $\|\cdot\|_2$ am besten als Prädiktor für die Subjektivnoten herausgestellt, die sich, angewendet auf Zeitreihen, als Energie der Zeitreihe interpretieren lässt: Je größer die Fläche unter dem Lenkmomentausschlag ist, desto größer ist der korrespondierende

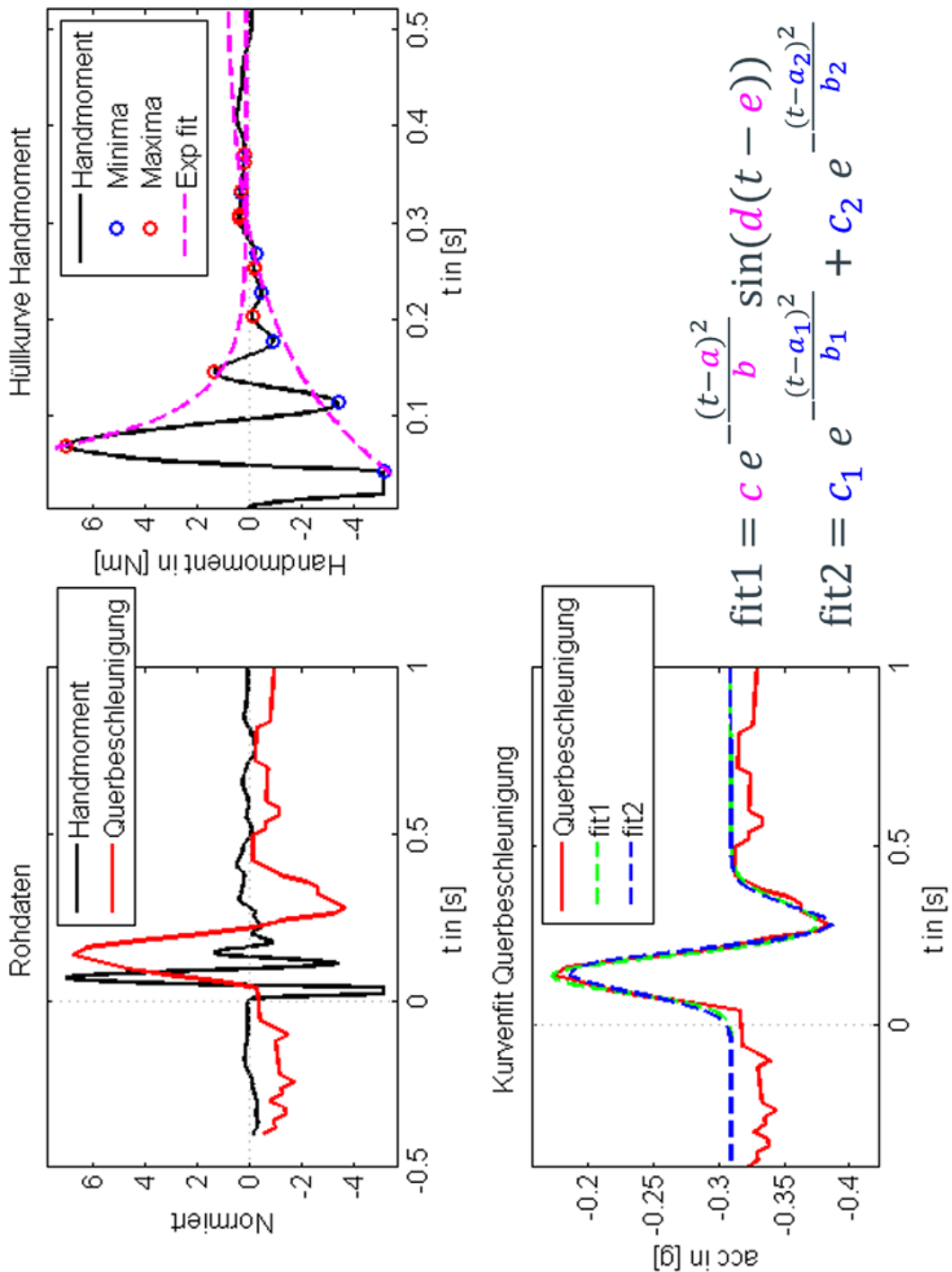


Abbildung 5.3: Kennwert-Generierung

Normwert und damit indirekt auch die subjektive Bewertung.

Um in die Kennwerte weitere Messdaten einfließen zu lassen, werden die Zeitreihen der Messkanäle konkateniert. Durch den unterschiedlichen Wertebereich der Kanäle wird jede Messreihe einzeln auf den Wertebereich $(-1, 1)$ skaliert. Der Vektorraum nimmt also für m Messkanäle $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_m^T)^T$ die Gestalt \mathbb{R}^{mn} an. Um Gewichtungen der Messkanäle in Bezug auf die Bewertungen zu berücksichtigen, werden im Folgenden Skalarprodukte im \mathbb{R}^{mn} betrachtet, aus denen eine Norm induziert wird. Jede symmetrische und positiv definite Matrix A induziert ein Skalarprodukt $\mathbf{x}^T A \mathbf{y}$ für zwei beliebige konkatenierte Messkanäle \mathbf{x} und \mathbf{y} aus dem \mathbb{R}^{mn} . Die induzierte Norm ist dann $\|\mathbf{x}\|_A = \sqrt{\mathbf{x}^T A \mathbf{x}}$. Wird A als Diagonalmatrix mit positiven Einträgen gewählt, ist positiv-Definitheit gegeben. Die Diagonaleinträge können als Gewichtungen interpretiert werden und fusionieren mehrere Messkanäle durch die induzierte Norm zu einem Kennwert. Die Struktur der Gewichtungs-Matrix A ist ein Spezialfall einer Block-Diagonalmatrix:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_2 I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_m I \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

Die Einheitsmatrizen I haben jeweils die Dimensionen $n \times n$ und wirken mit dem Gewichtungsfaktor a_i auf den Messkanal $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$. Die Norm $\|\mathbf{x}\|_A$ lässt sich demnach mit Hilfe der euklidischen Norm umformulieren zu

$$\|\mathbf{x}\|_{(a_1, a_2, \dots, a_m)}^2 = a_1 \|\mathbf{x}_1\|_2^2 + a_2 \|\mathbf{x}_2\|_2^2 + \dots + a_m \|\mathbf{x}_m\|_2^2. \quad (5.4)$$

Dabei wird $\|\cdot\|_A$ hier und im Folgenden prägnanter durch $\|\cdot\|_{(a_1, a_2, \dots, a_m)}$ ausgedrückt.

Um verschiedene Kennparameter aus der Normenfamilie $\|\cdot\|_{(a_1, a_2, \dots, a_m)}$ zu generieren, werden die a_i jeweils in allen Kombinationen verwendet: $a_i \in \{1, 2, 3\}$, das ergibt insgesamt 3^m Kennparameter.

Damit auch die Gradienten der Messkanäle mit in die Bewertungsberechnung einfließen können, wird die Norm erweitert, und zwar um die Ableitungen der Fahrzeugsignale. Die Norm der Ableitung einer Größe ist wiederum eine Norm und lineare Operationen von Normen ebenso, so dass eine neue Norm definiert wird durch:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}\|_{(a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_m)}^2 &= a_1 \|\mathbf{x}_1\|_2^2 + a_2 \|\mathbf{x}_2\|_2^2 + \dots + a_m \|\mathbf{x}_m\|_2^2 \\ &+ b_1 \left\| \frac{\Delta \mathbf{x}_1}{\Delta t} \right\|_2^2 + b_2 \left\| \frac{\Delta \mathbf{x}_2}{\Delta t} \right\|_2^2 + \dots + b_m \left\| \frac{\Delta \mathbf{x}_m}{\Delta t} \right\|_2^2. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Der Differenzenquotient $\frac{\Delta \mathbf{x}_i}{\Delta t}$ steht hier stellvertretend für eine Approximation der Ableitung der Zeitreihe \mathbf{x}_i nach der Zeit, zum Beispiel durch das Euler-Vorwärts-Verfahren.

Entzerrung der Messdaten

Die Norm-Varianten sind potentielle Kandidaten für eine möglichst hohe Korrelation mit den Subjektivnoten. Dazu soll die Norm invariant gegenüber den Fahrmanövern sein. Zum Beispiel würde bei einer Geradeausfahrt das Fahrzeugsignal Querbesehleunigung annähernd null sein, was zu einem Normwert von Null führt. Eine stationäre Kreisfahrt hätte hingegen konstante Querbesehleunigung und somit einen nicht verschwindenden Normwert, insbesondere ohne Störgrößenaufschaltung. Um diese beiden Manöver bzgl. der Norm vergleichbar zu machen, werden die Fahrzeugsignale von denen der stationären Fahrt subtrahiert, so dass nur noch die Störgrößen-Einflüsse Werte ungleich null annehmen. Diese Subtraktion besteht aus einer Filterung des Fahrzeugsignals mit einem Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz kleiner als die der Störgröße. Für den Lenkradwinkel ist die Identifikation solch einer Grenzfrequenz in Kapitel 6.2.2 gezeigt.

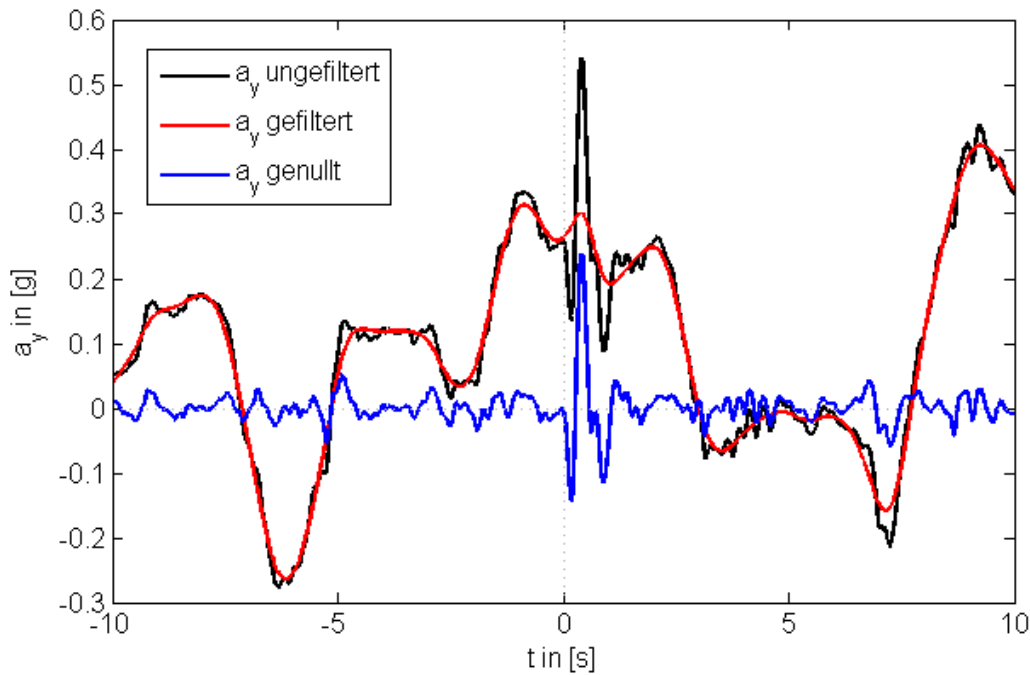
In der Abbildung 5.4 ist die Entzerrung des Querbesehleunigungssignals exemplarisch gezeigt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ tritt die Störgröße auf, woraufhin die Querbesehleunigung ausschlägt. Die Transformation sorgt dafür, dass die Messdaten zum einen automatisiert auswertbar sind und zum anderen eine Vergleichbarkeit hergestellt werden kann, um zum Beispiel das Maximum des Ausschlags zu bestimmen.

Ermittlung der Kennwerte

Mit der folgenden Zielfunktion werden nun die Parameter a_1, \dots, a_m der Matrix A ermittelt:

$$\min_A \left\{ \sum_j \left| \|\mathbf{x}^j\|_A - b^j \right| \right\}. \quad (5.6)$$

Darin werden über alle Versuche j die Residuen von Matrixnorm und korrespondierender Bewertung b mit der Methode der kleinsten Quadrate minimiert.

Abbildung 5.4: Transformation der Querbeschleunigung a_y

5.2 Vorhersage der Bewertungen

Um die Kennwerte bzgl. der Bewertungsvorhersagen zu priorisieren, wird der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman verwendet. Dieser ist ein Maß, wie gut eine monotone Funktion den Zusammenhang zwischen den Kennwerten und den Bewertungen vorhersagen kann. Im Unterschied zum Pearsonschen Korrelationskoeffizienten wird also nicht der lineare Zusammenhang gemessen, sondern allgemeiner der monotone Zusammenhang durch eine Rangfolge ausgedrückt, siehe auch [Fahrmeir u. a. \[2004\]](#). Die Berechnung erfolgt, nachdem die Daten in eine Rangfolge konvertiert wurden, analog zum Pearsonschen Korrelationskoeffizienten. Dieses Rangfolgen-Zusammenhangsmaß ist insbesondere bei den hier betrachteten ordinalskalierten Subjektivnoten sinnvoll, weil hier keine Metrik angegeben werden kann.

Die Priorisierung der im vorigen Abschnitt generierten Kennwerte geschieht durch eine Regressionsanalyse mit den daraus entstehenden Residuen. Um aus den Kennwerten die Bewertungen vorherzusagen, wird eine polynomielle Regressionsanalyse verwendet. Dabei werden für jeden Versuch ein Kennwert und dessen korrespondierende Bewertung in ein Diagramm eingetragen und es wird ein Polynom identifiziert, das diese Punktwolke approximiert.

5.2.1 Regression der Kreisfahrten

In Tabelle 5.1 sind die Korrelationswerte nach Spearman für Kennwerte mit hoher Korrelation zu den Subjektivnoten dargestellt. Eine ähnliche Darstellung findet sich in [Schmidt, 2008, S. 91ff.], mit vergleichbaren Experimenten. Allerdings ist bei diesem Vergleich zu beachten, dass die dort zugrunde liegenden Fahrmanöver in einem höheren Geschwindigkeitsbereich angesiedelt sind und der angewendete Korrelationskoeffizient unbekannt ist.

Die hier untersuchten Fahrmanöver haben bzgl. des Lenkmoments eine höhere Korrelation zu den Bewertungen als in der Arbeit von Schmidt [2008]. Gleichzeitig ist die Korrelation der maximalen Spannweiten von Gierrate und Querschleunigung geringer. Des Weiteren zeigen die sieben hier dargestellten Kennwerte aus der Normenfamilie eine deutlich höhere Korrelation als die klassischen Werte. Im Namen der Normen sind die Gewichtungen (a_1, \dots, a_4) sowie die Gewichtungen der Ableitungen (b_1, \dots, b_4) dargestellt, getrennt durch das Symbol „d“.

Die Abbildung 5.5 zeigt für vier Kennwerte eine quadratische Regression. Diese Kennwerte basieren auf Normen, die von einem Skalarprodukt induziert sind und einer Gewichtung von vier Messkanälen und deren Ableitungen entsprechen. Über den Diagrammen ist die Spearman-Korrelation in rot angegeben, wonach die Diagramme in aufsteigender Reihenfolge geordnet sind. Der MAX-Wert gibt den maximalen absoluten Fehler an und entspricht damit dem maximalen Prognosefehler der Regression. In dieser Konstellation ist der Kennwert „weightnorm 25 0,2 35 0 d 0,001 0,01 0,02 1,1“ offenbar am besten zur Vorhersage der Bewertungen geeignet, weil er eine niedrige maximale Falschbewertung mit einem niedrigen Fehlermaß vereint. Dieser Kennwert ist mit einer hohen Gewichtung aus Handmoment und Gierrate berechnet, was den Schluss nahe legt, dass die Fahrer das wahrgenommene Lenkmoment sowie die Gierrate als Hauptkriterium für die Bewertungen zugrunde legen. Das deckt sich mit den Ergebnissen aus Schmidt [2008].

5.2.2 Regression des Gesamtdatenpools

Wird eine Regressionsanalyse über alle Probanden in allen Versuchen gebildet, dann ergibt das mit einem quadratischen Regressionspolynom die Abbildung 5.6. Eine in den unabhängigen Variablen zweidimensionale Regression ist in Abbildung 5.7 gezeigt. Auf der x -Achse ist eine Skalarprodukt-norm $\|\mathbf{x}\|_{(a_1, a_2)} = \|\mathbf{x}\|_{(2,3)}$, bestehend aus gewichteten Lenkmoment und Querschleunigung, aufgetragen. Die y -Achse ist die euklidische Norm des Lenkmoments, in Nomenklatur der vorigen Skalarproduktfamilie ausgedrückt wäre dies $\|\mathbf{x}\|_{(a_1)} = \|\mathbf{x}\|_{(1)}$. Erwartungsgemäß ändert eine Multikorrelation den Gesamtfit nur unwesentlich, weil das gewichtete Skalarprodukt bereits alle Dimen-

	B	phi	ay	M	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7
Bewertung (B)	1,000										
Gierrate max. Spannweite (phi)	0,644	1,000									
Querbeschleunigung max. Spannweite (ay)	0,655	0,959	1,000								
Lenkmoment max. Spannweite (M)	0,714	0,633	0,670	1,000							
weightnorm 25 0,2 35 0 d 0,001 0,01 0,02 1,1 (w1)	0,770	0,820	0,836	0,944	1,000						
weightnorm 25 0,2 35 0 d 0,001 0,07 0,02 1,1 (w2)	0,770	0,821	0,837	0,943	1,000	1,000					
weightnorm 25 1,8 35 0 d 0,007 0,07 1,1 (w3)	0,770	0,823	0,840	0,942	1,000	1,000	1,000				
weightnorm 25 0,2 35 0 d 0,007 0,13 0,02 1,1 (w4)	0,770	0,821	0,838	0,943	1,000	1,000	1,000	1,000			
weightnorm 25 0,2 35 0 d 0,004 0,13 0,02 1,1 (w5)	0,770	0,821	0,838	0,943	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		
weightnorm 25 0,2 35 0 d 0,004 0,01 0,07 1,1 (w6)	0,770	0,820	0,837	0,943	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
weightnorm 25 0,2 35 0 d 0,007 0,07 1,1 (w7)	0,770	0,821	0,838	0,943	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabelle 5.1: Korrelation wichtiger Kennwerte

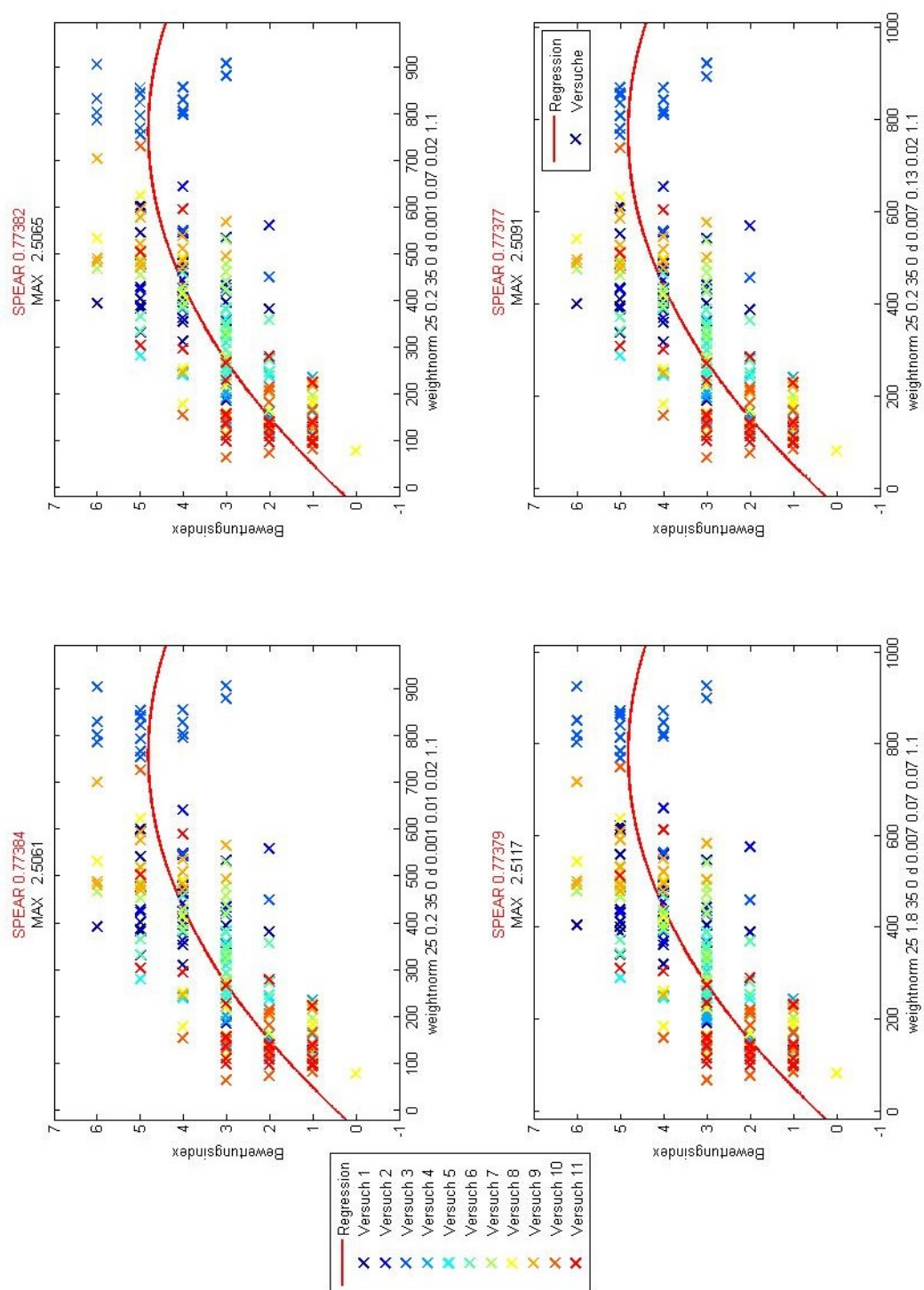


Abbildung 5.5: Regressionsanalyse Kreisfahrten

sionen berücksichtigt. Die Restabweichung in den Fitzahlen liegt in der biquadratischen Approximation der Datenwolke begründet, anstelle einer kubischen Approximation mit entsprechend weniger Freiheitsgraden im eindimensionalen Fall.

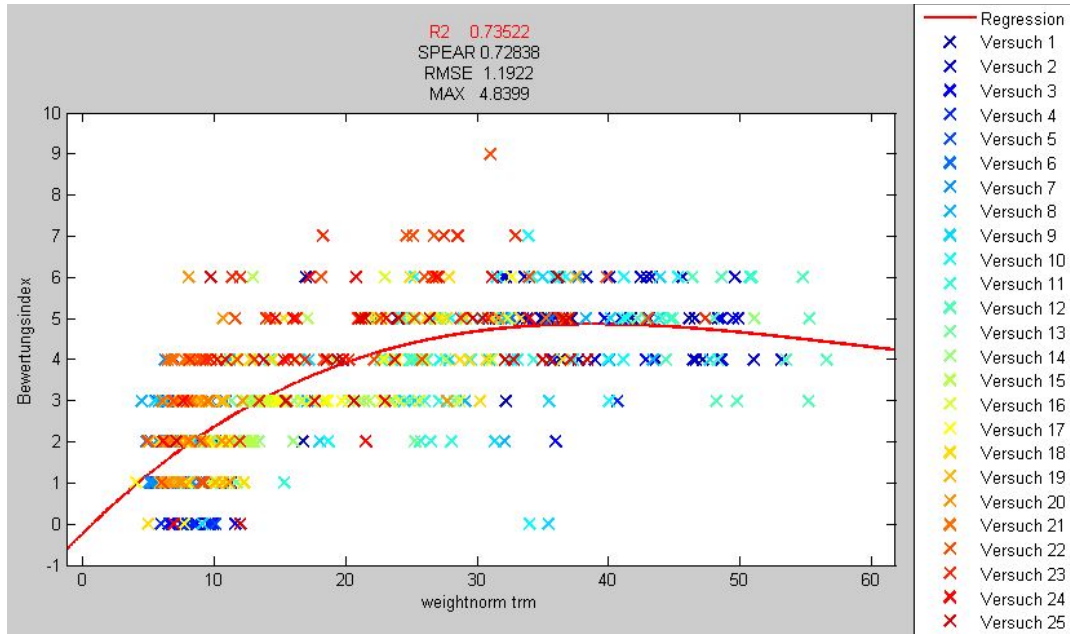


Abbildung 5.6: Regression über alle Fahrmanöver

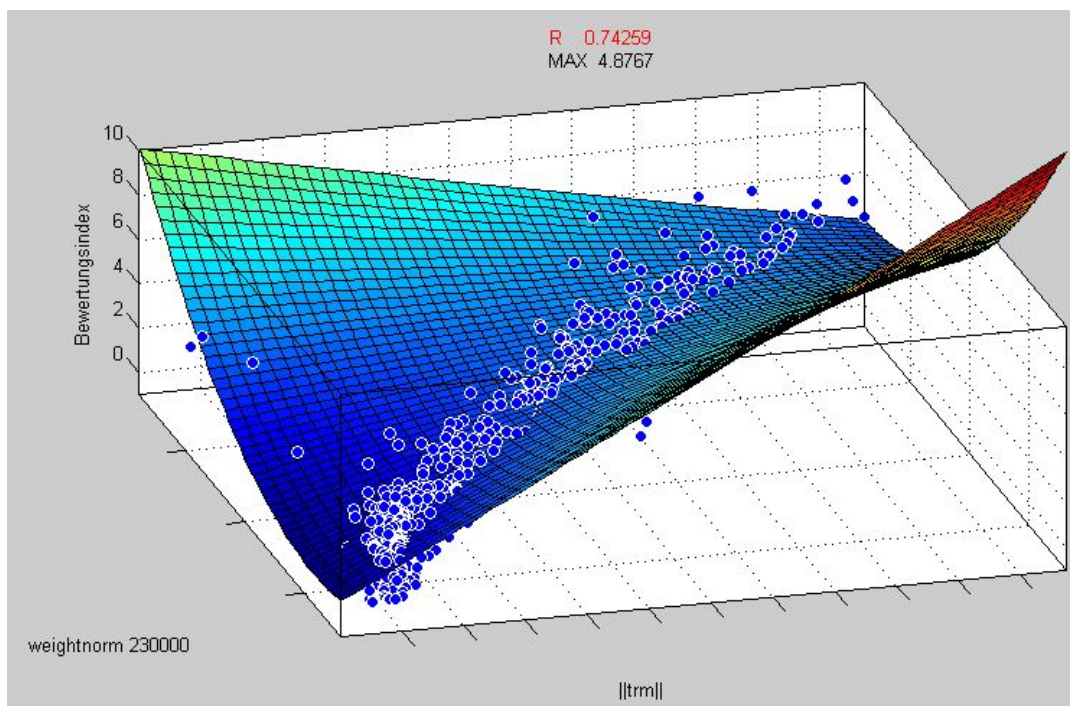


Abbildung 5.7: Regression in zwei unabhängigen Variablen

5.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden mehrere Verfahren zur Berechnung von Kennwerten vorgestellt. Durch den Vergleich der Regressionsfehler konnten Kennparameter identifiziert werden, die mit den Subjektivnoten einer Störgrößenbewertung korrelieren. Als besonders geeignet hat sich die Berechnung aus einer Skalarprodukt-Familie mit induzierter Norm herausgestellt, welche Messkanäle und deren Ableitungen unterschiedlich gewichtet. Diese Methode zur Generierung von Normenfamilien aus Skalarprodukten stellt ein allgemeines Werkzeug zur Verfügung, um Messkanäle zu komprimieren und Kennwerte zu generieren. Mit diesem Vorgehen ist es nun möglich, mittels Messdaten aus Fahrversuchen und realem Fahrer die subjektiven Sicherheitsbewertungen zu berechnen.

Im nächsten Kapitel wird gezeigt, wie der reale Fahrer virtualisiert werden kann, damit auch in der Simulation realistische Closed-Loop Fahrzeugsignale für die Objektivierung erzeugt werden können.

6 Das Fahrermodell

Um den Realversuch in das Labor zu transferieren, müssen der Fahrer und das Fahrzeug simuliert werden. Während Fahrzeugsimulationen Stand der Technik sind, wird die Simulation eines Fahrers im Kontext der Störgrößenaufschaltung im Folgenden beschrieben. Konventionelle Fahrermodelle stellen den Lenkwinkel im Wesentlichen mittels aus Vorausschau Punkten berechneten Vorausschauwinkeln ein, siehe Abbildung 6.1, und modellieren damit nur die visuelle Wahrnehmung des Fahrers. Aus dem vorangegangenen Abschnitt sind aber vor allem die Querbesehleunigung und das Lenkmoment als bedeutsame Größen der Fahrerbewertung hervorgegangen, was darauf hindeutet, dass diese Führungsgrößen für das Fahrermodell wesentlich sind. Abbildung 6.2 zeigt den Regelkreis-Kontext, mit dem der Fahrer im folgenden modelliert wird. Hierbei kommt es zur Annahme - wie bei Fahrermodellen allgemein üblich - dass der Lenkwinkel eine Ausgangsgröße des Fahrers ist und das Lenkmoment eine Eingangsgröße. Bei allen anderen Regelkreisblöcken setzt sich das Schema fort, dass Positionsgrößen Ausgänge und die Kraftgrößen Eingänge bilden. Der Fahrer wird nun als Blackbox modelliert, hier in Abbildung 6.3 beispielhaft mit Querbesehleunigung sowie Lenkmoment als Eingang und dem Lenkwinkel als Ausgang dargestellt. Je nach dem zugrunde liegenden Modell der Blackbox ergibt sich eine bestimmte Anzahl an Parametern, die so eingestellt werden, dass der Input aus den Realversuchen möglichst gut den Output approximiert. Damit sind die gesuchten Parameter die Lösung eines Optimierungsproblems und repräsentieren den realen Fahrer als Fahrermodell in der Simulation.

6.1 Systemidentifizierung

Unter Systemidentifizierung wird das Verfahren verstanden, die Parameter eines dynamischen Systems mithilfe vorgegebener Messdaten zu optimieren, [Isermann und Münchhof \[2011\]](#). Als anschauliches Beispiel eignet sich das Fitten von Messpunkten mit Kurve durch die Methode der kleinsten Quadrate. In diesem Sinne ist die Systemidentifizierung eine Erweiterung der Kurvenanpassung, indem anstatt einer Funktion ein Operator identifiziert wird.

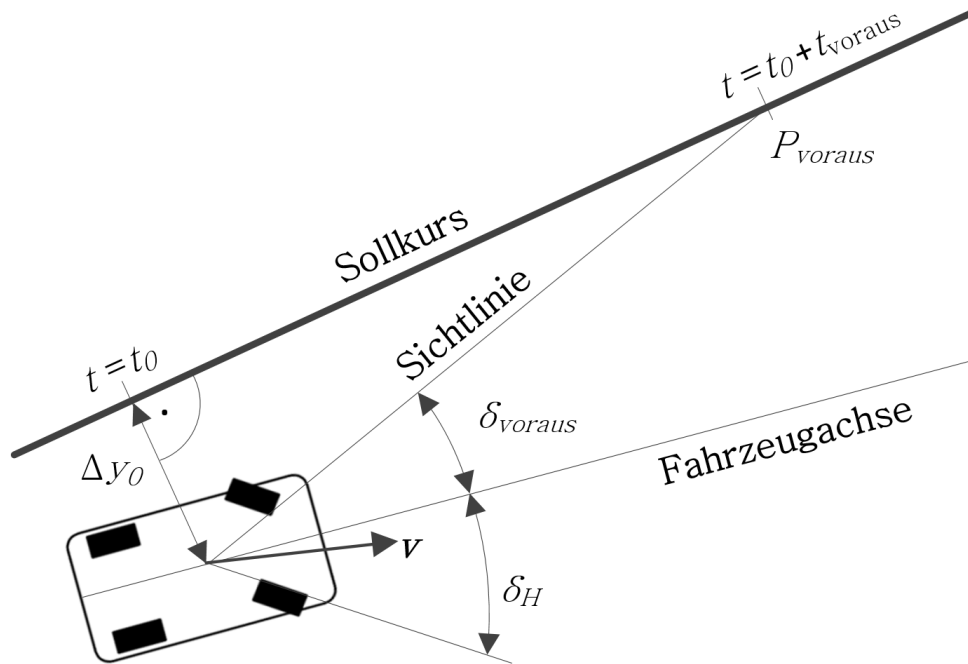


Abbildung 6.1: Geometrische Darstellung eines Vorausschauwinkels δ_{voraus} der aus einem Vorausschauort P_{voraus} berechnet wird, siehe Abschnitt 2.4 und [Salvucci und Gray \[2004\]](#)

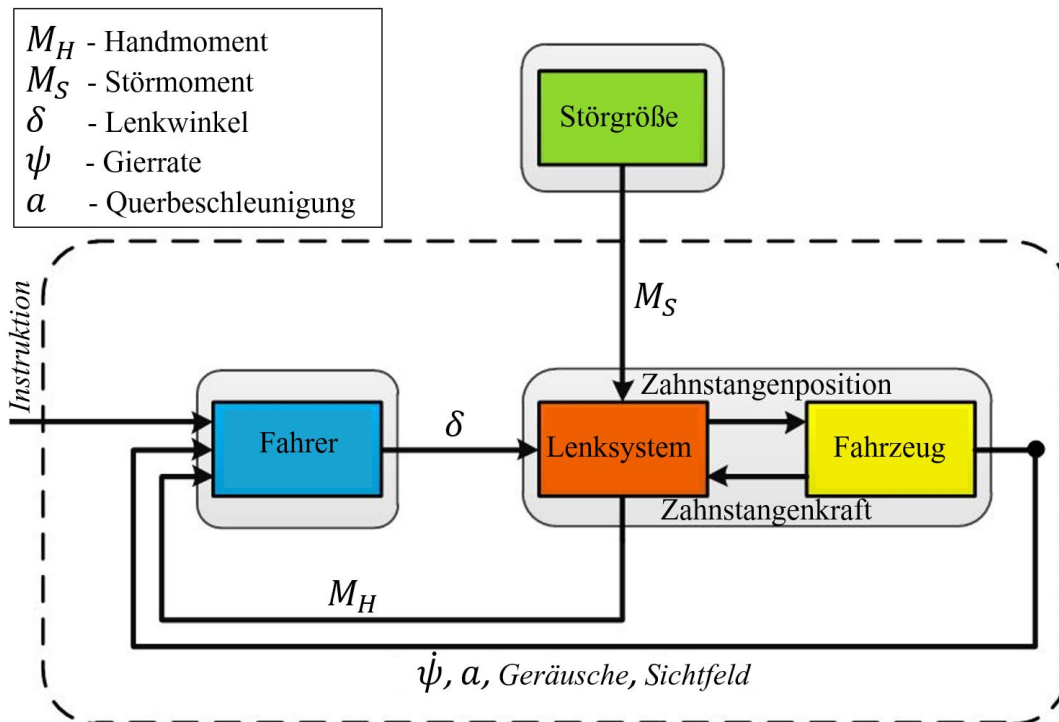


Abbildung 6.2: Fahrzeug-Fahrer-Umwelt Regelkreis

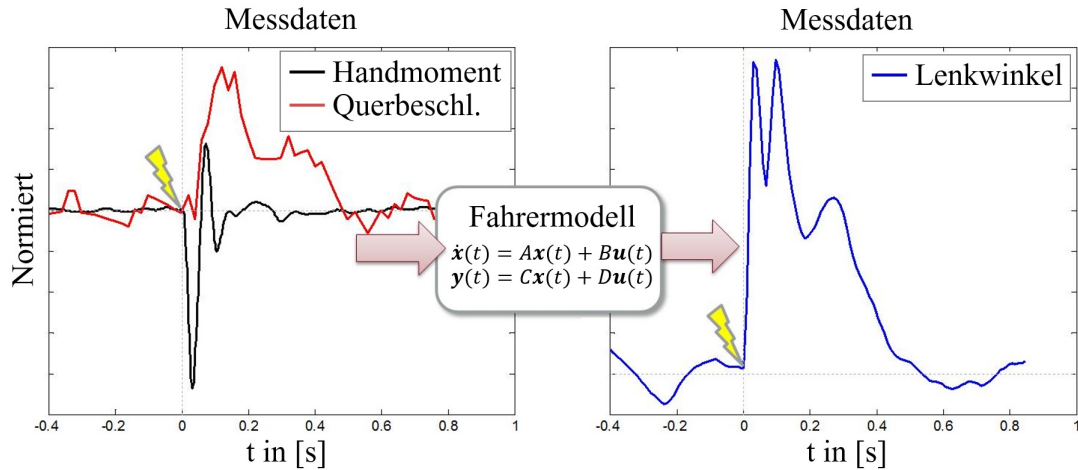


Abbildung 6.3: Identifizierung eines Fahrermodells

6.1.1 Lineare Zustandsraummodelle

Das Fahrermodell wird durch ein lineares Zustandsraummodell modelliert. Die diskreten zeitinvarianten Systemgleichungen werden beschrieben durch

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t_{k+1}) &= A\mathbf{x}(t_k) + B\mathbf{u}(t_k), \\ \mathbf{y}(t_k) &= C\mathbf{x}(t_k) + D\mathbf{u}(t_k), \\ \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Die Ordnung eines solchen Systems ist durch die Länge des Vektors \mathbf{x} definiert. Für jeden Zeitschritt $k \in \mathbb{N}_0$ mit der Zeitschrittweite Δ werden zum Zeitpunkt $t_k = k\Delta$ ein neuer Zustand $\mathbf{x}(t_{k+1})$ aus dem vorherigen $\mathbf{x}(t_k)$ berechnet sowie der Ausgangsvektor $\mathbf{y}(t_k)$. Dieser repräsentiert bei den hier vorgestellten Fahrermodellen den Lenkwinkel und ist in diesem Fall ein Skalar. Der Eingangsvektor \mathbf{u} ist aus Messeingängen zusammen gesetzt, diese können zum Beispiel Lenkmoment, Querbeschleunigung, Gierrate, Fahrzeuggeschwindigkeit, Längsbeschleunigung oder Vorausschauwinkel sein.

6.1.2 Identifizierung von 30 Fahrermodellen

Die identifizierten Parameter des Fahrermodells werden versuchsunabhängig ermittelt, so dass jeder Versuch inklusive Störgrößenaufschaltung mit dem gleichen Fahrermodell gefahren wird. Im resultierenden Optimierungsproblem wird eine globale Lösung gesucht, das Ergebnis für die stationäre Kreisfahrt ist in Abbildung 6.4 zu sehen. Die Darstellung zeigt, dass der Lenkwinkel des Fahrers durch das Fahrermodell gut approximiert wird. Hier soll noch einmal hervorgehoben werden, dass dieses Fahrermodell den Lenkwinkel nur anhand

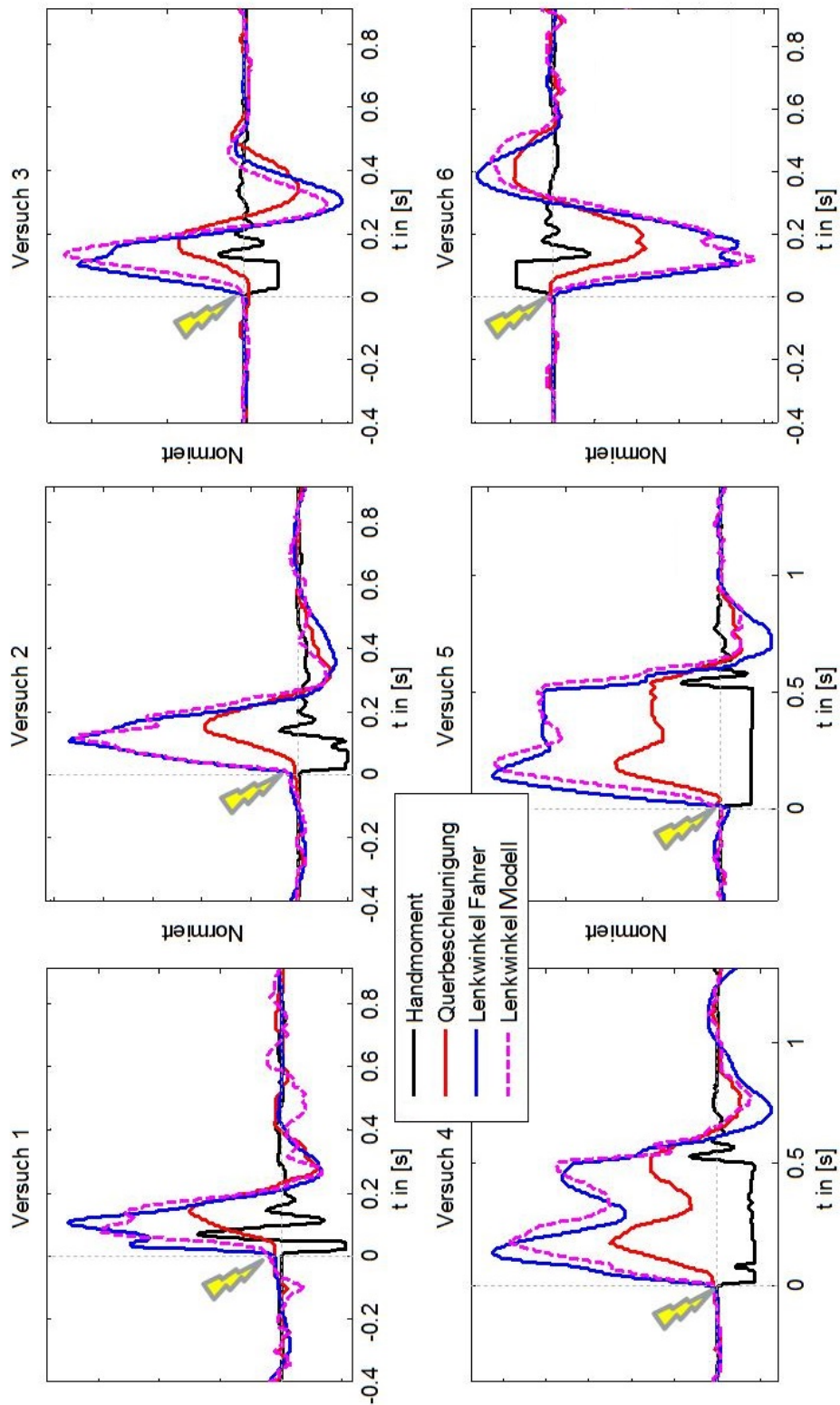


Abbildung 6.4: Validierung des Fahrermodells

der Querbeschleunigung und des Lenkmoments stellt. In diesem Sinne steuert das Fahrermodell zwar blind und damit ohne Verfolgung einer Solltrajektorie, aber dennoch mit hoher Präzision. Das belegt, dass die Bedeutung der Querbeschleunigung und des Lenkmoments für die Querdynamikregelung sehr hoch sind und zwar unabhängig von der visuellen Wahrnehmung des Fahrers.

Kombination der Systemeingänge

Die Eingänge \mathbf{u} aus Gleichung 6.1 können Lenkmoment, Querbeschleunigung, Gierrate, Fahrzeuggeschwindigkeit, Längsbeschleunigung und Vorausschauwinkel sein. In Schmidt [2008] wurden Querbeschleunigung und Lenkmoment als wichtige Kenngrößen für die Bewertung von Störgrößen identifiziert, so dass diese einen Eintrittspunkt in die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten bieten.

Besonders wertvoll als Systemeingänge haben sich das Lenkmoment, die Querbeschleunigung und die Gierrate erwiesen. Da der Lenkwinkel und die Gierrate im Fahrzeug außerhalb des Grenzbereichs linear zusammen hängen, wird die Gierrate verzögerungsfrei in der Matrix D auf den Lenkwinkel modelliert. Ordnungen größer als eins trugen nur unwesentlich zur genaueren Vorhersage bei, erhöhten aber die Oszillation des Lenkwinkels signifikant. In diesem Sinne ist es also ratsam, eine Balance aus niedriger Ordnung und hoher Modellgüte anzustreben. Das folgende System zeigt das Fahrermodell mit den Eingängen Lenkmoment, Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrzeuggeschwindigkeit als u_1, \dots, u_4 :

$$\begin{aligned} x(t_{k+1}) &= ax(t_k) + B\mathbf{u}(t_k), \\ y(t_k) &= cx(t_k) + D\mathbf{u}(t_k), \quad \text{mit} \\ x(0) &= x_0 \end{aligned} \quad \begin{aligned} B &= (b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4), \\ D &= (0 \quad 0 \quad d_3 \quad d_4), \\ \mathbf{u}(t_k) &= \begin{pmatrix} u_1(t_k) \\ u_2(t_k) \\ u_3(t_k) \\ u_4(t_k) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Damit ergeben sich pro Fahrermodell die 8 Parameter $a, b_1, b_2, b_3, b_4, c, d_3, d_4$, die im Folgenden durch den Parametervektor \mathbf{p} ausgedrückt werden. Diese Parameter werden nun für jeden der 30 Probanden separat identifiziert, mittels aller Versuche, die ein Proband gefahren ist.

Parameteridentifizierung durch Optimierung

Die Identifizierung der Parameter wird im Folgenden für einen Probanden exemplarisch beschrieben. Aus den aufgezeichneten Versuchen für diesen Probanden sind die Ein- und Ausgänge des Systems als Soll-Werte, unter Annahme eines stationären Betriebspunktes mit Störgrößenaufschaltung, bekannt. Diese Daten dienen als Identifizierungsgrundlage, um im Rahmen der späteren Validierung auch auf andere Betriebspunkte zu schließen. In [Pieper \[2014\]](#) wird dieses Verfahren ausführlich diskutiert, insbesondere werden Ein- und Ausgangskombinationen systematisch untersucht.

Werden die Soll-Eingänge an das System angelegt, ergeben sich die gesuchten Parameter \mathbf{p} aus einem Optimierungsproblem, indem die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Ausgang $\|\sigma(\mathbf{p}, \mathbf{u}^j) - \mathbf{y}_{\text{Soll}}^j\|$ minimiert wird. Die Funktion σ gibt den Lenkwinkelverlauf in Abhängigkeit der Parameter \mathbf{p} des Zustandsraummodells und der Eingangsgrößen \mathbf{u}^j im Versuch j an, während $\mathbf{y}_{\text{Soll}}^j$ den gemessenen Lenkwinkelverlauf aus dem gleichen Versuch j angibt. Dieses Minimierungsproblem stellt sich mathematisch dar als:

$$\min_{\mathbf{p}} \{ \|\sigma(\mathbf{p}, \mathbf{u}^j) - \mathbf{y}_{\text{Soll}}^j\| \}. \quad (6.3)$$

Mit dieser Formulierung wird der Parametersatz \mathbf{p} abhängig vom Versuch j berechnet. Um einen Parametersatz für alle Versuche eines Probanden zu bestimmen, wird das Optimierungsproblem erweitert zu

$$\min_{\mathbf{p}} \left\{ \sum_j \|\sigma(\mathbf{p}, \mathbf{u}^j) - \mathbf{y}_{\text{Soll}}^j\| \right\}. \quad (6.4)$$

Hier sei als Ausblick noch erwähnt, dass Gewichtungsparemeter denkbar sind, um die Versuche unterschiedlich zu werten.

Als Optimierungswerkzeug für 6.4 eignet sich die Matlab-System-Identification Toolbox [The MathWorks \[2014\]](#). Darin werden unterschiedliche Löser und Werkzeuge angeboten, um 6.4 effizient zu implementieren. Als geeignet hat sich der Levenberg-Marquardt Algorithmus erwiesen, der ein globales Minimum \mathbf{p} robust berechnet.

Somit kann für jeden Proband ein Parametersatz \mathbf{p} angegeben werden, der mit dem Modell 6.2 in allen Versuchen dieses Probanden, den Lenkwinkel in einem optimalen Maß approximiert.

Beispielhaft sind hier nun die dimensionslosen Werte von Modell 6.2 angegeben, die für einen Probanden identifiziert wurden:

$$\begin{aligned}
a &= 0,991, \\
c &= 814, \\
B &= (3,34 \quad -1,53 \cdot 10^3 \quad -66,3 \quad -2,79), \\
D &= (0 \quad 0 \quad 13,7 \quad 0,169), \\
x_0 &= 0.
\end{aligned} \tag{6.5}$$

Die Eingänge u_1, \dots, u_4 entsprechen Lenkmoment, Querbeschleunigung, Gierrate und Fahrzeuggeschwindigkeit. Es sei angemerkt, dass aufgrund unterschiedlicher Wertebereiche der Eingangsgrößen, die Werte in dieser Darstellung stark spreizen. So hat der Lenkwinkel zum Beispiel einen Wertebereich von $\pm 200^\circ$, während die Querbeschleunigung $\pm 1 \text{ g}$ nicht verlässt.

Dieses Modell führt zum in Abbildung 6.5 gezeigten Lenkwinkelverlauf. Das gezeigte Manöver ist eine Slalomfahrt mit 15 m Pylonenabstand und 35 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit. Die aufgeschaltete Störgröße zum Zeitpunkt 0 s ist ein plötzlicher Ausfall der Unterstützungsleistung für 100 ms, gut zu sehen an dem Ausschlag des Lenkmoments. Während das Lenkmoment dem Signalverlauf zeitlich vorausseilt, aber dem Lenkwinkelverlauf nur ungeeignet folgt, eilt die Gierrate hingegen verlaufsgetreu hinterher. Das Modell fusioniert die Eingangsgrößen zu einem realistischen Lenkwinkelverlauf und wird im Folgenden Störkompensations-Fahrermodell \mathcal{S} genannt.

Auf diese Weise werden nun alle Probanden identifiziert, die wenigstens zehn Versuche gefahren sind, um die Robustheit der Parameter zu gewährleisten. Die daraus resultierenden Streuungen in den Parametersätzen werden im nächsten Abschnitt untersucht.

Parameterkorrelation

Um die Unterschiede in den Fahrermodellen zu analysieren, werden hier die Parametersätze der Probanden miteinander korreliert, um Abhängigkeiten zu finden und die Fahrermodellstruktur der Systemmatrizen zu analysieren.

Um den linearen Zusammenhang zwischen den Parametern zu ermitteln, wird jeder Parametervektor eines Probanden als Zufallsvektor behandelt, der bei acht Systemparametern aus acht Zufallsvariablen besteht. Jeder Proband mit seinem zugehörigen Zufallsvektor ist demnach eine Realisierung des Zufallsexperiments.

Dazu werden die empirischen Korrelationskoeffizienten berechnet, bei denen die Zufallsvariablen paarweise miteinander verglichen werden. Die Korrelationskoeffizienten berechnen sich zu

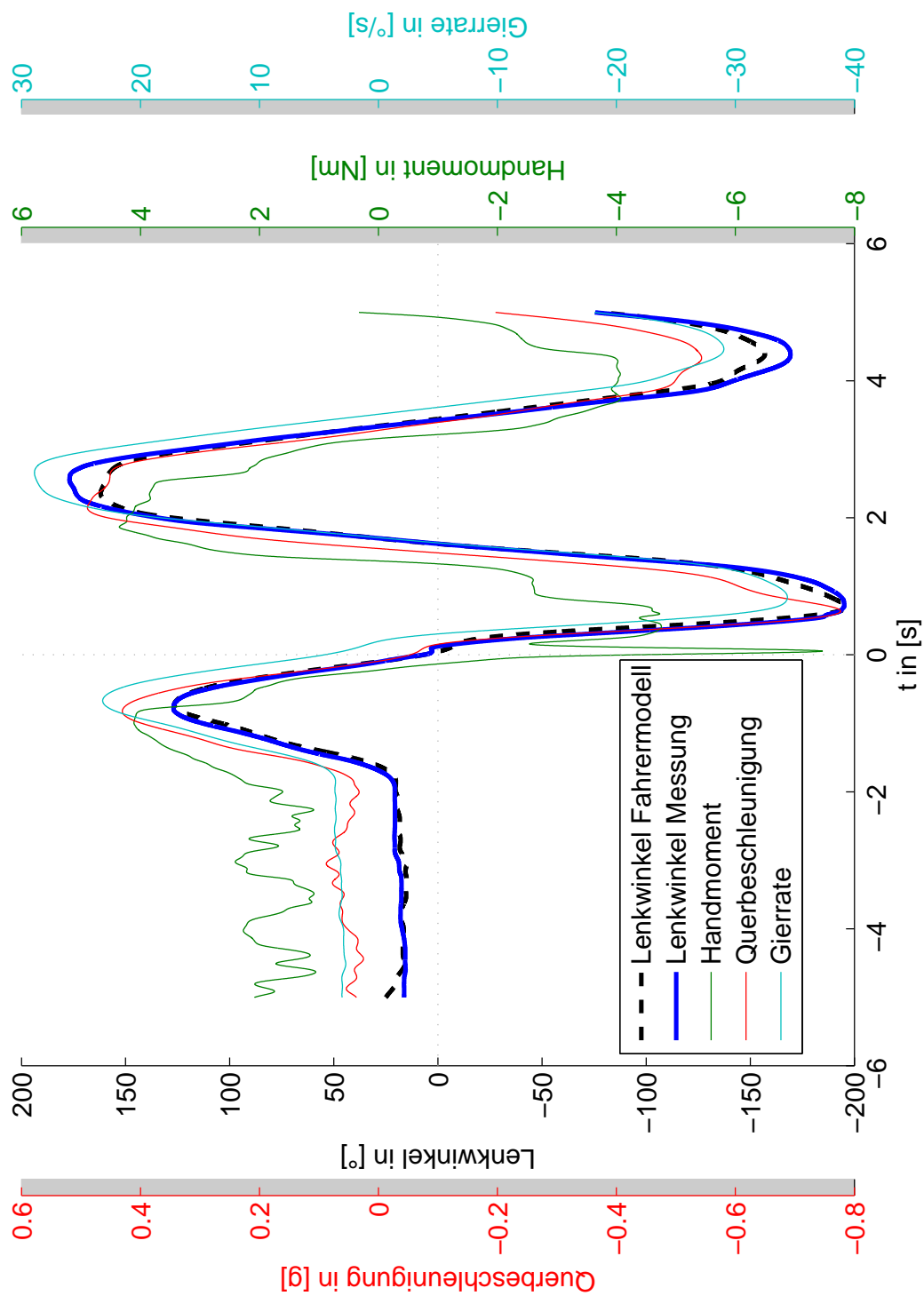


Abbildung 6.5: Lenkwinkelberechnung aus Fahrzeuggrößen bei Slalomfahrt

$$\rho(p, q) = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(q_i - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}} \quad (6.6)$$

Dabei repräsentieren p und q zwei Zufallsvariablen aus dem Parametervektor \mathbf{p} und p_i sowie q_i die Realisierungen bei Proband i , mit insgesamt $n = 24$ Probanden.

Um die stärksten Korrelationen zu finden, werden die p -Werte berechnet, unter Berücksichtigung der Null-Hypothese „keine Korrelation“. Für Korrelationen, bei denen der p -Wert kleiner als das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ist, sind vier Parameterkorrelationen in Abbildung 6.6, der Größe nach absteigend sortiert, dargestellt. Der Parameterzusammenhang $p_4 \sim p_7$ zeigt dabei einen transitiven Zusammenhang durch $p_1 \sim p_4$ und $p_1 \sim p_7$ auf.

Das erlaubt es, die Systemstruktur so zu vereinfachen, dass nur noch wenige Parameter identifiziert werden müssen. Dies verkleinert die Anzahl der lokalen Minima für den Optimierungsalgorithmus und ermöglicht es, das Fahrermodell mit weniger Versuchsdaten zu trainieren und trotzdem ein aussagekräftiges Modell zu erhalten. Das resultierende Systems hat dann die Struktur

$$\begin{aligned} x(t_{k+1}) &= ax(t_k) + B\mathbf{u}(t_k), \\ y(t_k) &= cx(t_k) + D\mathbf{u}(t_k), \quad \text{mit} \\ x(0) &= x_0 \end{aligned} \quad \begin{aligned} B &= (b_1 \quad L_2(b_1) \quad L_1(a) \quad b_4), \\ D &= (0 \quad 0 \quad L_3(a) \quad L_4(b_4)), \\ \mathbf{u}(t_k) &= \begin{pmatrix} u_1(t_k) \\ u_2(t_k) \\ u_3(t_k) \\ u_4(t_k) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Die linearen Operatoren L_i bezeichnen hierbei die Regressionsgeraden aus Abbildung 6.6 in der Darstellungsreihenfolge. Die Fahrermodelle unterscheiden sich nun nur noch durch die drei schwach korrelierenden Parameter a, b_4, c .

Das hier vorgestellte Verfahren eignet sich, um das allgemeine System 6.2 zu vereinfachen und das Fahrermodell auf die wesentlichen Parameter zu reduzieren.

6.2 Hybridisierung des Fahrermodells

Im vorigen Abschnitt wurde ein Fahrermodell vorgestellt, welches in der Lage ist, aus Lenkmoment, Querbeschleunigung und Gierrate den Lenkwinkel zu

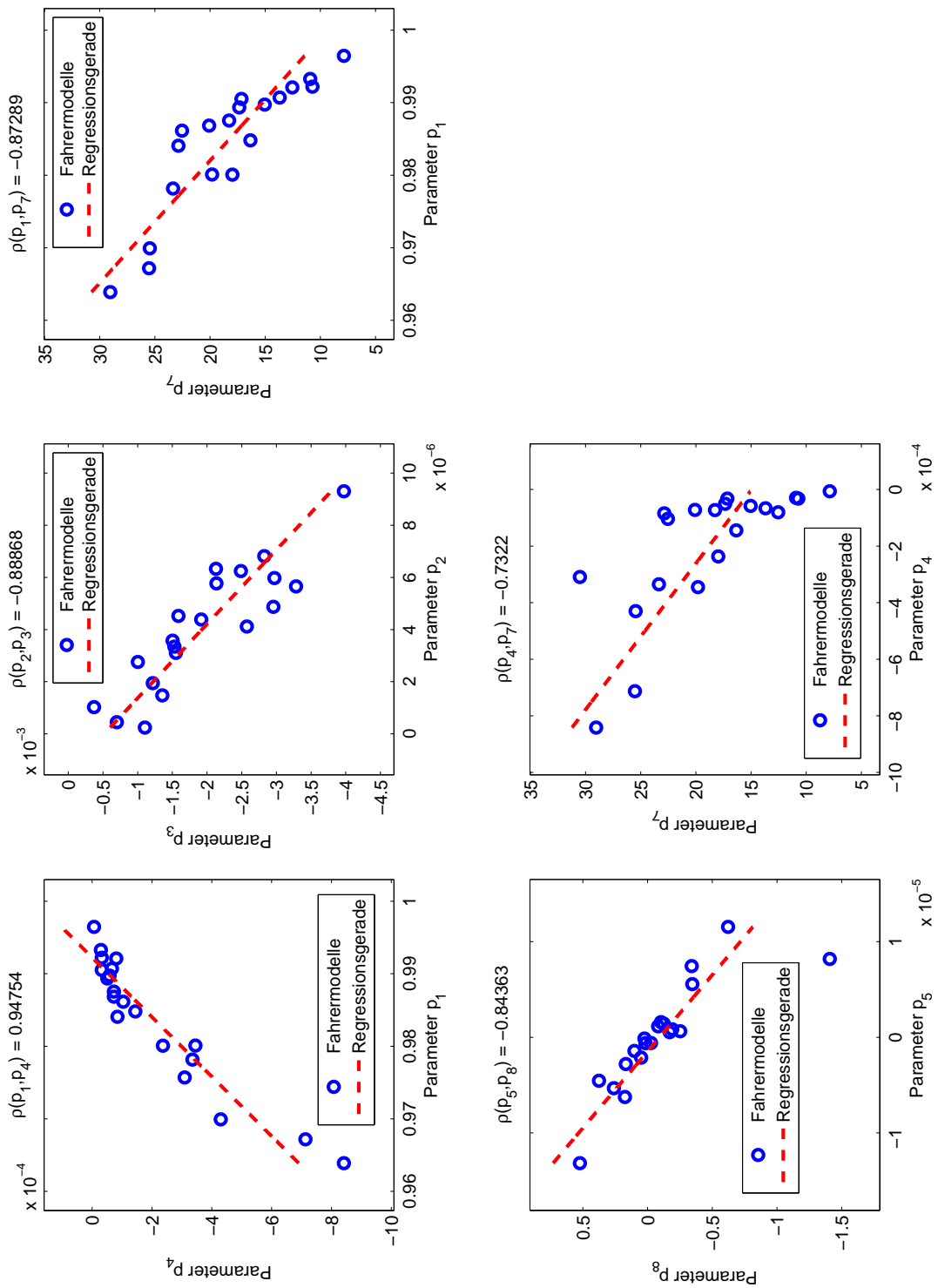


Abbildung 6.6: Korrelation der Fahrermodell-Parameter

stellen. Dabei gehen keine Informationen über den Kursverlauf in die Lenkwinkelberechnung ein, so dass das Störkompensations-Fahrermodell blind steuert. Um definierte Manöver zu fahren, ist eine Kursverlauf-abhängige Berechnung notwendig. Dazu werden in diesem Abschnitt zwei Verfahren vorgestellt, eines, welches den Lenkwinkel mithilfe von Systemidentifizierung zusätzlicher Eingangsgrößen berechnet und ein zweites, welches ein beliebiges klassisches Fahrermodell mit dem Störgrößenkompensations-Fahrermodell fusioniert.

6.2.1 Systemidentifizierung mit Vorausschauwinkeln

Dieses Verfahren entspricht einer Erweiterung von 6.2. Dazu wird der Vektor \mathbf{u} um zwei Vorausschauwinkel $u_5(t_k), u_6(t_k)$ als Eingangsgrößen erweitert. In diesem Zuge vergrößern sich B und D um jeweils zwei Einträge, wenn die Ordnung des Systems weiterhin auf eins gehalten wird. Das erweiterte System hat dann folgende Struktur:

$$\begin{aligned}
 B &= (b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad b_5 \quad b_6), \\
 D &= (0 \quad 0 \quad d_3 \quad d_4 \quad d_5 \quad d_6), \\
 x(t_{k+1}) &= ax(t_k) + B\mathbf{u}(t_k), \\
 y(t_k) &= cx(t_k) + D\mathbf{u}(t_k), \quad \text{mit} \\
 x(0) &= x_0
 \end{aligned}
 \quad \mathbf{u}(t_k) = \begin{pmatrix} u_1(t_k) \\ u_2(t_k) \\ u_3(t_k) \\ u_4(t_k) \\ u_5(t_k) \\ u_6(t_k) \end{pmatrix}.$$

(6.8)

Damit erhöht sich die Anzahl der Parameter um vier und kann mit der gleichen Methode zur Parameterkorrelation weiter strukturiert werden. Dieses verallgemeinerte Fahrermodell empfiehlt sich, wenn der Soll- und der Ist-Kurs als Messdaten vorliegen, wenn also entweder ein realer Versuch mit entsprechenden Positions-Messequipment durchgeführt wurde oder die Simulationsdaten als Grundlage zur Identifizierung herangezogen werden.

6.2.2 Fusion von Fahrermodellen

Stehen für eine Identifizierung kein Soll- oder Ist-Verlauf des Kurses zur Verfügung, zum Beispiel aufgrund der aufwändigen Messprozedur, kann alternativ ein beliebiges Fahrermodell \mathcal{B} als Ausgangspunkt für eine Fusionierung mit dem Störkompensations-Fahrermodell herangezogen werden. Das Modell \mathcal{B} hat

als Eingang den Kursverlauf und berechnet daraus den Lenkwinkel. Ein solches Fahrermodell kann zum Beispiel das aus [Schimmel \[2010\]](#) sein, welches aus zwei Vorausschauwinkeln mittels zwei PID-Reglern den Lenkwinkel berechnet. Die im Folgenden vorgestellte Methode fusioniert die Lenkwinkelverläufe aus dem Störkompensations-Fahrermodell \mathcal{S} mit dem Modell \mathcal{B} . Dazu werden die Lenkwinkelverläufe Kurz- und Langzeit gefiltert und entsprechend gewichtet addiert. Das Modell \mathcal{S} kann den Lenkwinkelverlauf bei hochfrequenten Störungen realistisch wiedergeben, driftet aber auf längere Zeiträume bezogen vom Kurs ab und ist für den Verlauf blind. Fahrermodell \mathcal{B} wiederum kann dem Kursverlauf im stationären Bereich gut folgen, ist aber unempfindsam bei kurzzeitig einwirkenden Störgrößen, die sich hauptsächlich im Handmoment und der Querbeschleunigung auswirken. Diese Datenfusion wird mit dem Komplementärfilter gelöst, der im Folgenden auf die Fahrermodelle angewendet wird.

Komplementärfilter

Als Anwendungsfeld des Komplementärfilters wird besonders gern die Luftfahrt zitiert, siehe auch [Osder u. a. \[1973\]](#). Häufig anzutreffen ist dieser Filtertyp bei kleinen unbemannten Luftfahrzeugen, deren Inertialsensoren auf MEMS-Technologie (Microelectromechanical systems) basieren. Dort liegt das Problem vor, dass die räumliche Lage des Fluggerätes aus den Daten von Beschleunigungs- und Drehratensensoren berechnet wird. Die Beschleunigungssensoren liefern zwar absoluttreue Richtungswerte, allerdings ist technologiebedingt ein Rauschen anhängig, das keine dynamische Lageerkennung ermöglicht. Drehratensensoren hingegen sind kurzzeitig hochgenau, driften aber über längere Zeiträume. Der Komplementärfilter fusioniert die beiden Sensordaten, indem er den Beschleunigungssensor tiefpassfiltert, den Drehratensensor hochpassfiltert und beide Filtersignale korrekt gewichtet addiert. Dieses Anwendungsbeispiel wird im Folgenden auf die Lenkwinkelberechnung übertragen, indem die Lenkwinkel zweier unterschiedlicher Fahrermodelle \mathcal{S} und \mathcal{B} fusioniert werden.

Der Komplementärfilter mit dem fusionierten Lenkwinkel $\phi^{(\mathcal{B},\mathcal{S})}$ aus den Lenkwinkelgrößen $\phi^{\mathcal{S}}$ von Modell \mathcal{S} und $\phi^{\mathcal{B}}$ von \mathcal{B} stellt sich dann dar zu

$$\begin{aligned}\phi^{(\mathcal{B},\mathcal{S})} &= \phi^{\mathcal{B}} \cdot G(s) + \phi^{\mathcal{S}} \cdot (1 - G(s)) \\ &= (\phi^{\mathcal{B}} - \phi^{\mathcal{S}}) \cdot G(s) + \phi^{\mathcal{S}} \quad \text{mit} \\ G(s) &= \frac{1}{\tau s + 1}.\end{aligned}\tag{6.9}$$

Die Übertragungsfunktion G wirkt auf $\phi^{\mathcal{B}}$ als Tiefpassfilter und mit $1-G$ auf $\phi^{\mathcal{S}}$ als Hochpassfilter. Die Konstante τ berechnet sich aus der Grenzfrequenz f_c zu $\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$. Der Wert von f_c wird im Folgenden experimentell ermittelt.

Wird G mit der Zeitschrittweite δt und dem Euler-vorwärts Verfahren $s \approx \frac{z-1}{z \cdot \delta t}$ diskretisiert, führt der vorwärts gerichtete Differenzenquotient auf die Diskretisierung

$$G_d = \frac{(1-c)z}{z-c} \quad \text{mit} \quad c = \frac{\tau}{\tau + \delta t}. \quad (6.10)$$

Die Trennfrequenz wird durch $c \in [0, 1]$ beeinflusst, wobei die Spezialfälle $c = 0$ zu Modell \mathcal{B} und $c = 1$ zu Modell \mathcal{S} führen. Die Abbildung 6.7 zeigt die Frequenzdarstellung von Lenkwinkelsignalen mit und ohne Störgröße. Hier ist bei etwa 0,2 Hz eine Trennfrequenz zu erkennen, ab welcher der Fahrer mit den Störgrößen interagiert. Daraus errechnet sich der Parameter $c \approx 0,9987$.

Wird der kontinuierliche Komplementärfilter 6.9 mit 6.10 diskretisiert, entsteht die Differenzengleichung

$$\phi^{(\mathcal{B}, \mathcal{S})}(t_k) = c(\phi(t_{k-1}) + \phi^{\mathcal{S}}(t_k) - \phi^{\mathcal{S}}(t_{k-1})) + (1-c)\phi^{\mathcal{B}}(t_k). \quad (6.11)$$

Dieser diskrete Komplementärfilter wird im aktuellen Zeitschritt t_k berechnet und verwendet die Zeitschrittweite $\delta t = t_k - t_{k-1}$.

Mit dieser Filtermethode ist es nun möglich, bereits bestehende Fahrermodelle um das Störkompensations-Fahrermodell zu erweitern und die Gewichtung der beiden Modelle mit dem Trennfrequenz-Parameter c zu steuern. Diese Methode wird nun beispielhaft auf eine Störgrößenaufschaltung während einer stationären Kreisfahrt angewandt. Das Vorausschauwinkel-Fahrermodell der dSpace Simulationsumgebung aus Kapitel 3.1 wird dabei als Modell \mathcal{B}_1 verwendet. Für das Störgrößenfahrermodell \mathcal{S} dient das Modell aus Abbildung 6.5. Weiterhin wird hier noch ein zweites Vorausschauwinkel-Fahrermodell \mathcal{B}_2 zum Vergleich herangezogen, das nach der Methode aus Abschnitt 6.2.1 erstellt wurde. Damit \mathcal{B}_2 zum reinen Vorausschauwinkel-Fahrermodell wird, wurden die Eingangsgrößen $u_1(t_k), \dots, u_4(t_k)$ bei der Identifizierung entfernt und der Lenkwinkel nur mit den beiden Vorausschauwinkeln $\mathbf{u}(t_k) = (u_5(t_k), u_6(t_k))^T$ identifiziert.

Die Fusion von \mathcal{B}_1 und \mathcal{S} wird zu $(\mathcal{B}_1, \mathcal{S})$ während \mathcal{B}_2 und \mathcal{S} zu $(\mathcal{B}_2, \mathcal{S})$ wird. In Abbildung 6.8 ist der Vergleich der verschiedenen Fahrermodelle dargestellt. Modell \mathcal{B}_2 zeigt bei dieser Kreisfahrt ein anderes Spurhalteverhalten wie \mathcal{B}_1 , weil es die Spur nur mit zwei Vorausschau Punkten regelt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die hybriden Fahrermodelle ungedämpft auf die Störgrößeneinflüsse reagieren, während die klassischen Modelle stumpf die Sollspur regeln.

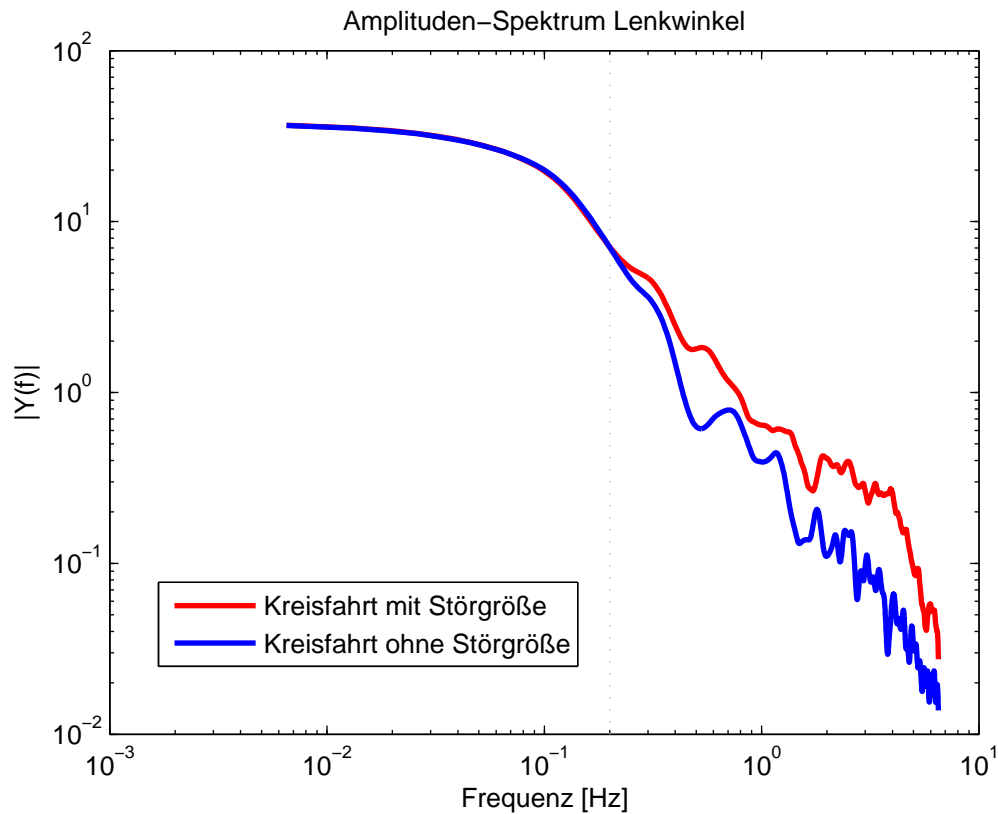


Abbildung 6.7: Fourier-Transformation des Lenkwinkelverlaufs aus zwei stellvertretenden stationären Kreisfahrten mit und ohne Störgrößenaufschaltungen

6.3 Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Fahrermodell regelt den Lenkwinkel nicht wie bisher üblich nur über Vorausschauwinkel, sondern auch über das Lenkmoment, die Querbeschleunigung und die Gierrate. Aus den Probandenversuchen wurden mit der hier vorgestellten Methode Fahrermodelle erzeugt, die der Streuung der Probanden während des Auftretens einer Störgröße entsprechen.

Weiterhin wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem existierende Fahrermodelle um eine Störgrößen-Kompensation erweitert werden können. Damit ist der Zugang zu Anwendungsfällen geschaffen, in denen Fahrermodelle in Fahrsimulationen mit Störgrößeneinflüssen eine realistische Lenkwinkelregelung leisten müssen.

Kombiniert man die in diesem Kapitel gewonnene Fahrermodellklasse mit der Objektivierung aus Kapitel 5, eröffnet dieses Verfahren die Möglichkeit, den Closed-Loop-Versuch mit Störgrößeneinflüssen zu reproduzieren und aus den simulierten Signalverläufen die subjektiven Bewertungen zu berechnen.

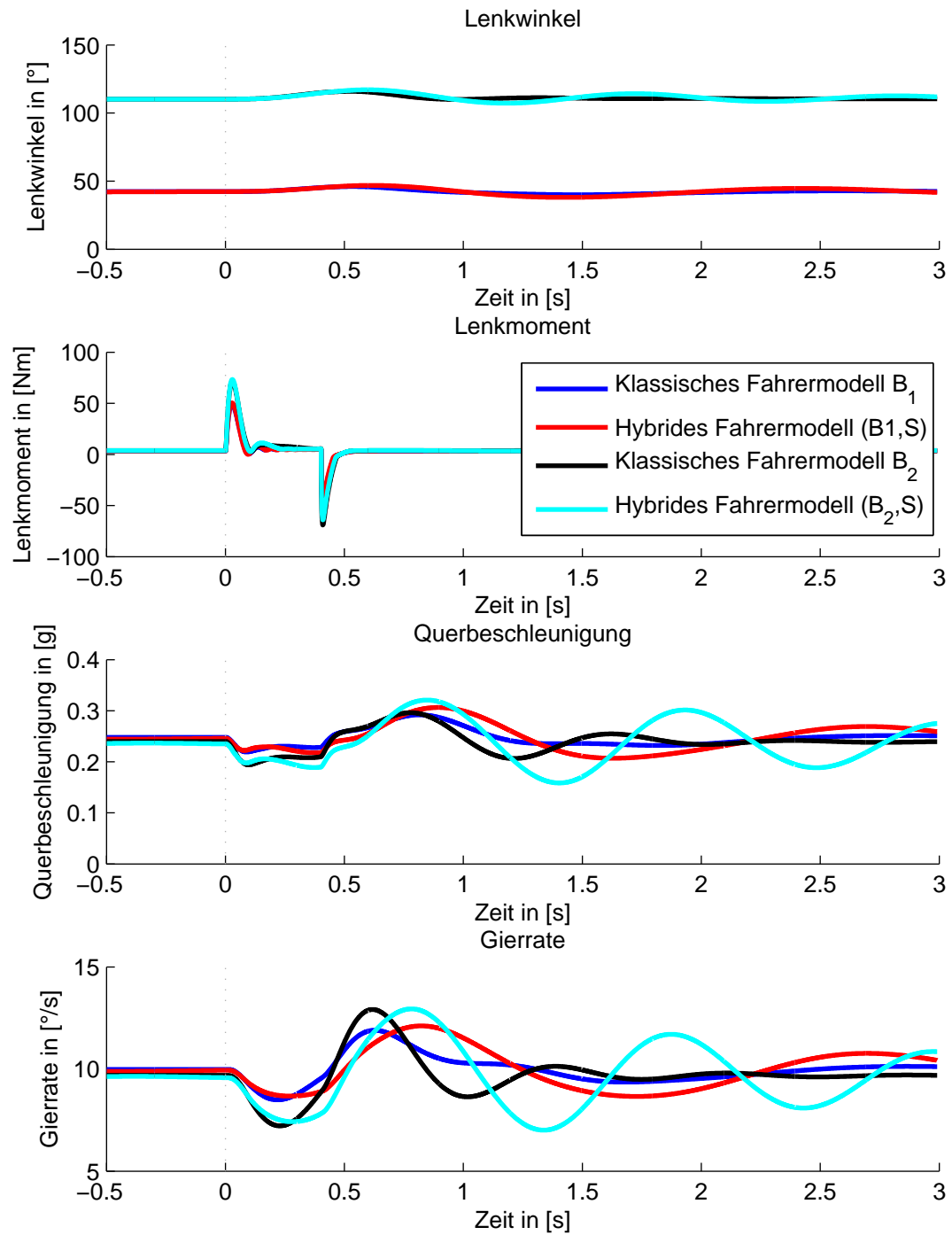


Abbildung 6.8: Vergleich des klassischen Fahrermodells mit dem erweiterten Störgrößen-Fahrermodell

7 Zusammenfassung

7.1 Zusammenfassung

Die hohen Sicherheitsanforderungen für elektromechanische Lenksysteme erfordern eine genaue Kenntnis über gefährlich bewertete Lenkmomente, die zu einer sicherheitskritischen Situation führen können. Insbesondere die Entwicklung von komplexen Lenkfunktionen bedingt eine Softwareüberwachung des Motormoments einer EPS. Da im Testszenario des V-Modells der [ISO 26262-1 \[2011\]](#) nicht alle Kombinationen der Systemeingänge getestet werden können, gibt es im Steuergerät der EPS eine Überwachungsebene, die das Lenkmoment beim Überschreiten definierter Grenzen saturiert. Diese Grenzen wurden bisher durch aufwändige Probandenversuche ermittelt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein umfangreicher Probandenversuch im Realfahrzeug und am Fahrsimulator durchgeführt, um objektive Kriterien für das Sicherheitsempfinden zu identifizieren. Dabei wurde eine neue systematische Methode zur Generierung von Kennwerten vorgestellt. Mithilfe dieser Kennwerte können die Bewertungen zum Sicherheitsempfinden aus bereits durchgeführten Probandenversuchen berechnet werden. Da dieser Prozess allerdings weiterhin von einem Fahrer abhängig ist, der das Fahrzeug während einer auftretenden Störgröße ausregelt, wurde zudem eine Fahrermodellklasse entwickelt, welche die menschliche Lenkwinkelregelung während dieser kurzzeitig auftretenden Störungen simulieren kann. Diese Fahrermodellklasse besteht aus Fahrern unterschiedlichen Typs, die durch Identifizierung von Fahrermodellen aus den Probandenfahrern ermittelt wurden. Des Weiteren wurde eine Methode zur Fusion dieser Modelle mit bereits bewährten Fahrermodellen vorgestellt, um auch Abseits von Störgrößeneinflüssen Fahrmanöver durchzuführen. Damit ist die Grundlage für ein breites Anwendungsfeld geschaffen, um in virtuellen Fahrversuchen mit Fahrermodellen Kritikalitätsbewertungen vorherzusagen.

7.2 Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit

Es wurden vielfältige Arbeiten zur Objektivierung von Fahr- und insbesondere auch Lenkgefühl aus der Literatur zitiert. Darin wurden subjektive Bewertungen mit objektiven Kennwerten korreliert, um mittels Regression eine Abbildungsvorschrift zu konstruieren und damit das Fahrgefühl schon während

der Entwicklungsphase des Fahrzeugs vorherzusagen. Die Kennwerte wurden in diesen Arbeiten heuristisch generiert und sind entweder stark an Fahrzeugsignale angelehnt oder verwenden mathematische Funktionen, die auf die Fahrzeugsignale angewendet werden. In jedem Fall verbleibt die Frage nach der Vollständigkeit der dadurch erhobenen Kennwerte und damit einer systematischen Vorgehensweise, um objektive Kennwerte zu generieren.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem aus Messreihen systematisch objektive Kennwerte generiert werden. Dazu wurde ein mathematisches Funktional verwendet, das diskretisierte Messreihen auf skalare Werte abbildet. Das Funktional in einem endlichdimensionalen Vektorraum wurde aus einem Skalarprodukt und dessen kanonischer Norm konstruiert. Angewandt auf konkatenierte diskretisierte Messkanäle umfasst es somit alle linearen Abbildungen und stellt damit ein systematisches Verfahren zur Kennwertgenerierung dar.

Das Verfahren wurde in dieser Arbeit auf die Bewertung von sicherheitskritischen Lenkstörungen angewendet und diente dazu, die Bewertungen aus Fahrversuchen im Closed-Loop Manöver zu berechnen.

In der Entwicklung von elektromechanischen Lenksystemen wird eine Simulation dieser Fahrversuche angestrebt, um Grenzen für sicherheitskritische Lenkstörungen so früh wie möglich im Entwicklungsprozess zu definieren. Dazu wurde ein Fahrermodell entwickelt, das mittels Systemidentifizierung aus den Störsituationen parametrisiert wurde. Im Vergleich zu konventionellen Fahrermodellen, die mittels Vorausschauwerten und dem Gierwinkel den Lenkwinkel regeln, sind für das Ausregeln der Störgröße insbesondere die Querbeschleunigung, die Gierrate und das Handmoment von Bedeutung. Diese Fahrzeugsignale wurden in dem vorliegenden Fahrermodell zur Lenkwinkelregelung verwendet und erweitern damit die Anwendung von Fahrermodellen auf die Kompensation von Störgrößen.

Des Weiteren wurde eine Variante des Fahrermodells vorgestellt, die mit konventionellen Fahrermodellen fusioniert werden kann, so dass das Modell zur Störgrößenkompensation als Erweiterung dient. Diese Fusion basiert auf dem Komplementärfilter und es wurde gezeigt, dass dieser in der Lage ist ein klassisches Fahrermodell mit dem dynamischen Störgrößenkompensationsmodell in einem hybriden Modell zu vereinigen.

Mit den Bausteinen der systematischen Objektivierung und des hybriden Fahrermodells zur Störgrößenkompensation steht nun ein Untersuchungswerkzeug zur Verfügung, um EPS-Störungen in einer simulierten Fahrt virtuell zu bewerten.

7.3 Ausblick

Mithilfe dieser beiden Bausteine, nämlich Objektivierung und Fahrermodell, könnte die Definition der Sicherheitsgrenzen in zukünftigen Probandenversuchen in der Simulation vorhergesagt oder sogar ersetzt werden und zwar, ohne dass ein Fahrer das Sicherheitsempfinden in einem neuen Prototyp jemals herausgefahren hätte. Diese im Entwicklungsprozess frühzeitige Schätzung der Sicherheitsbewertungen ermöglicht daher eine frühzeitige Definition der Sicherheitsgrenzen und damit die Validierung der Softwarefunktionen nach [ISO 26262-1 \[2011\]](#). Außerdem werden dadurch frühe Prototypenmuster einen vergleichsweise höheren Sicherheitsstandard haben.

Als weiterführende Arbeit bietet es sich unmittelbar an, die hier vorgestellte Objektivierung aus Skalarprodukt-Kennwerten mit dem Störgrößen-Fahrermodell zu vereinen und die potentiellen Anwendungen hinsichtlich Mach- und Umsetzbarkeit zu untersuchen.

Da die Methode unabhängig von der konkreten Störgröße ist und sich nur auf die Wahrnehmung des Fahrers bezieht, könnte diese auf Szenarien wie zum Beispiel Seitenwindstörungen, Fahrbahnunebenheiten, Reibwertänderungen oder ESP-Funktionen angewendet werden, um dort jeweils beherrschbare Grenzen zu definieren. Mit diesem Schritt würde die elektromechanische Lenkung aus dem Fokus rücken und das Gesamtfahrzeug in den Mittelpunkt.

Des Weiteren werden die Motion-Cueing-Algorithmen und der Antrieb dynamischer Fahrsimulatoren mit Bewegungssimulation stetig verbessert, so dass der Zeitpunkt kommen wird, um Lenkgefühl im erweiterten Sinne am Fahrsimulator subjektiv zu untersuchen. Dazu zählt auch die konsistente Integration des Fahrers in eine realistische Umweltsimulation, vorstellbar durch moderne Videobrillen, die Motion-Sickness schon heute fast vollständig eliminieren können.

Mit der Weiterentwicklung von Fahrermodellen mittels Systemidentifizierung empfiehlt es sich, dynamische Systeme auf nichtlineare zu erweitern. Das dadurch bedingte deutlich anspruchsvollere Optimierungsproblem kann dann mittels evolutionären Algorithmen trainiert werden, ganz nach dem Vorbild des menschlichen Lernprozesses.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Regelkreis Fahrzeugführung und Lenkgefühl im engeren Sinn . . .	3
1.2	Schritt 1 - Subjektivbewertungen im Fahrsimulator	6
1.3	Schritt 2 - Objektivierung zur Berechnung der Subjektivnoten . .	6
2.1	Schema des Aufbaus einer EPS, Lunkeit [2014]	8
2.2	EPS mit achsparalleler Motoranordnung der Volkswagen AG, Jablonski u. a. [2008]	9
2.3	Dual Pinion EPS der Firma ZF Lenksysteme, Pfeffer und Harrer [2011]	9
2.4	Aufbau RCEPS der Volkswagen AG, Schöttler u. a. [2012]	10
2.5	EPS mit Unterstützungseinheit an der Lenksäule, Pfeffer und Harrer [2011]	11
2.6	Blockschaltbild der EPS-Mechanik, angelehnt an Lunkeit [2010]	12
2.7	Die V-Modell-Struktur der ISO 26262-1 [2011]	15
2.8	Vier-Ebenen Beurteilungsschema, angelehnt an Gies und Marusic [1998]	22
2.9	Die Störungsbewertungsskala, angelehnt an Neukum und Krüger [2003]	31
2.10	Geometrische Darstellung der Vorausschaupunkte, angelehnt an Wilumeit und Jürgensohn [1997]	33
2.11	Drei-Ebenen-Modell aus psychologischer Sicht (rechts) und aus Ingenieurs-Sicht (links), Donges [2012]	34
2.12	Regelungsschaltbild des Zwei-Ebenen-Modells, Donges [2012] . .	35
3.1	EPS-Fahrsimulator mit HIL-Prüfstand im Hintergrund	40
3.2	Schematische Darstellung des Simulationsmodells	41
3.3	Struktur der Simulationsmodells, angelehnt an Patil [2013] . . .	42

3.4	Schematische Darstellung des EPS-Fahrsimulators	44
3.5	Validierung der Simulation für eine Kurvenfahrt mit der Störgröße Zusatzlenkimpuls zum Zeitpunkt $t = 0$	46
4.1	Messdatenerfassung am Kopf des Probanden sowie fahrzeugfest mit einem inertialen Navigationssystem	48
4.2	Geradeausfahrt	49
4.3	Kreisfahrt	49
4.4	Slalomfahrt	50
4.5	Zusatzmoment-Variationen	51
4.6	Störungsbewertungsskala	52
4.7	Boxplot der Bewertungsdifferenzen zwischen Fahrsimulator und realem Fahrzeug, geordnet nach aufsteigendem Median	56
5.1	Versuchsergebnisse	58
5.2	Streuung der Bewertungen	59
5.3	Kennwert-Generierung	61
5.4	Transformation der Querbeschleunigung a_y	64
5.5	Regressionsanalyse Kreisfahrten	67
5.6	Regression über alle Fahrmanöver	68
5.7	Regression in zwei unabhängigen Variablen	68
6.1	Geometrische Darstellung eines Vorausschauwinkels δ_{voraus} der aus einem Vorausschaupunkt P_{voraus} berechnet wird, siehe Abschnitt 2.4 und Salvucci und Gray [2004]	72
6.2	Fahrzeug-Fahrer-Umwelt Regelkreis	72
6.3	Identifizierung eines Fahrermodells	73
6.4	Validierung des Fahrermodells	74
6.5	Lenkwinkelberechnung aus Fahrzeuggrößen bei Slalomfahrt	78
6.6	Korrelation der Fahrermodell-Parameter	80
6.7	Fourier-Transformation des Lenkwinkelverlaufs aus zwei stellvertretenden stationären Kreisfahrten mit und ohne Störgrößenaufschaltungen	84

6.8 Vergleich des klassischen Fahrermodells mit dem erweiterten Störgrößen-Fahrermodell	85
--	----

Tabellenverzeichnis

2.1	Bewertungstabelle für Lenkgefühl, angelehnt an Heißing und Brandl [2002]	23
2.2	Bewertungstabelle für Lenkgefühl, Zschocke [2009]	25
5.1	Korrelation wichtiger Kennwerte	66

Abkürzungsverzeichnis

EPS	Electrical Power Steering
RCEPS	Rack-Concentric-EPS
APA	Achsparallele Anordnung
cEPS	Column EPS
VW	Volkswagen
AG	Aktiengesellschaft
ASM	Automotive Simulation Models
TMeasy	Tire Model easy
KP	Kennparameter
CP	Center Point
DLC	Distance to line crossing
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
MEMS	Microelectromechanical systems
ECU	Electronic Control Unit

A Fragebogen

Versuchsperson Nr.	1 / Tag n	2 / Tag n
Wetter (Sonne/Regen/Wind)		
Außentemperatur		
Anzahl der Insassen?		
Fahrerfahrung in Jahren?		
Jährliche Fahrleistung in [km]?		
Besitz eines eigenen Autos?		
Statur des Probanden?		
Größe des Probanden in [m]?		
Alter des Probanden?		
männlich / weiblich ?		
Gewicht des Probanden in [kg]?		
Sitzposition nah / fern vom Lenkrad?		
Arme angewinkelt / gestreckt ?		
Beide Hände am Lenkrad? [Überwiegend / Selten]		
Pause von - bis?		
Klimaanlage an?		

B Fahrmanöver

Nr	Testziel	Testbeschreibung	Fahrmanöver
1	Selbstlenker, 20ms, 20Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 20ms Faktor = 0 Offset = 20Nm	Geradeausfahrt 30 km/h
2	Selbstlenker, 20ms, 20Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 20ms Faktor = 0 Offset = 20Nm	Geradeausfahrt 50 km/h
3	Selbstlenker, 20ms, 20Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 20ms Faktor = 0 Offset = 20Nm	Geradeausfahrt 100 km/h
4	Selbstlenker, 20ms, 20Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 20ms Faktor = 0 Offset = 20Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
5	Selbstlenker, 20ms, -20Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 20ms Faktor = 0 Offset = -20Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
6	Selbstlenker, 100ms, 5 Nm (Offset)	T1 und Tges = 100ms Faktor = 1 Offset = 5Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
7	Selbstlenker, 100ms, 6 Nm (Offset)	T1 und Tges = 100ms Faktor = 1 Offset = 6Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
8	Selbstlenker, 100ms, 0,4 Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 100ms Faktor = 0 Offset = 0,4Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
9	Selbstlenker, 100ms, -0,4 Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 100ms Faktor = 0 Offset = -0,4Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
10	Selbstlenker, 100ms, 1 Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 100ms Faktor = 0 Offset = 1Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
11	Selbstlenker, 100ms, -1 Nm (Ersatzwert)	T1 und Tges = 100ms Faktor = 0 Offset = -1Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
12	Selbstlenker, 500ms, 3,3 Nm (Offset)	T1 und Tges = 500ms Faktor = 1 Offset = 3,3Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
13	Selbstlenker, 500ms, 3,7 Nm (Offset)	T1 und Tges = 500ms Faktor = 1 Offset = 3,7Nm	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²

Nr	Testziel	Testbeschreibung	Fahrmanöver
14	Selbstlenker, 10s, 3,3 Nm Frequenz 100Hz (Offset)	T1 und T2 = 5ms; Tges = 10s Faktor = 1 Offset = 3,3Nm	Slalomkurs 2 (11x15m)
15	Selbstlenker, 10s, 6,0 Nm Frequenz 100Hz (Offset)	T1 und T2 = 5ms; Tges = 10s Faktor = 1 Offset = 6,0Nm	Slalomkurs 2 (11x15m)
16	Selbstlenker, 10s, 1,8 Nm Frequenz 50Hz (Offset)	T1 und T2 = 10ms; Tges = 10s Faktor = 1 Offset = 1,8Nm	Slalomkurs 2 (11x15m)
17	Selbstlenker, 10s, 3,0 Nm Frequenz 50Hz (Offset)	T1 und T2 = 10ms; Tges = 10s Faktor = 1 Offset = 3,0Nm	Slalomkurs 2 (11x15m)
18	Selbstlenker, 10s, 0,5 Nm Frequenz 10Hz (Offset)	T1 und T2 = 50ms; Tges = 10s Faktor = 1 Offset = 0,5Nm	Geradeausfahrt 100 km/h
19	Selbstlenker, 20s, 0,5 Nm Frequenz 1Hz (Offset)	T1 und T2 = 500ms; Tges = 20s Faktor = 1 Offset = 0,5Nm	Geradeausfahrt 30 km/h
20	Selbstlenker, 20s, 0,5 Nm Frequenz 1Hz (Offset)	T1 und T2 = 500ms; Tges = 20s Faktor = 1 Offset = 0,5Nm	Geradeausfahrt 100 km/h
21	Plötzliche Reduktion der U-Leistung auf 30%	T1 und Tges = 10s Faktor = 0,3 Offset = 0	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
22	Plötzliche Reduktion der U-Leistung auf 0%	T1 und Tges = 10s Faktor = 0 Offset = 0	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
23	Plötzliche Reduktion der U-Leistung auf 0%	T1 und Tges = 10s Faktor = 0 Offset = 0	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 30 km/h
24	Plötzlicher Ausfall 100ms	T1 und Tges = 100ms Faktor = 0 Offset = 0	Kreisfahrt gegen Uhr, r = 50m, 50 km/h => a=4m/s ²
25	Plötzlicher Ausfall 100ms	T1 und Tges = 100ms Faktor = 0 Offset = 0	Slalomkurs 2 (11x15m)
26	Plötzlicher Ausfall 150ms	T1 und Tges = 150ms Faktor = 0 Offset = 0	Slalomkurs 2 (11x15m)

C Versuchsablauf

Im Zuge der Einweisung der Probanden wird auf die folgenden Punkte hingewiesen. Dadurch soll eine repräsentative und sichere Durchführung der Probandenversuche garantiert werden.

- Information für die Teilnehmer:
 - Bitte sanft bremsen, da Laptops im Auto sind.
 - Bitte den Anweisungen der Versuchsleiter unbedingt Folge leisten.
 - Während der Fahrt bitte nicht mit den Versuchsleitern unterhalten, Fragen sind natürlich erlaubt.
- Vor der Fahrt:
 - Sitzposition + Spiegel einstellen
- Während der Einfahrzeit/Proberunden
 - Zeit um sich an das Auto zu gewöhnen
 - Kurze Erklärung, was geschehen wird.
- Während der Testfahrt:
 - Gespräche auf ein Minimum reduzieren.
 - Gegebenenfalls bei Bewertungen > 6 nachfragen, ob es „eine gefährliche Situation“ war
 - Bei Bewertungen abweichend der Erwartung nachfragen.
- Auswertung:
 - Ausschlusskriterien: kein Verständnis für die Skala, statistischer Ausreißer.

Literaturverzeichnis

- [Braess 2001] BRAESS, H. H.: Lenkung und Lenkverhalten von Personenkraftwagen: Was haben die letzten 50 Jahre gebracht, was kann und muss noch getan werden? In: *VDI-Bericht, VDI-Verlag* 1632 (2001), S. 13–55 [27](#)
- [Busemeyer und Bruza 2012] BUSEMEYER, J. R. ; BRUZA, P. D.: *Quantum Models of Cognition and Decision*. Cambridge University Press, 2012 [53](#)
- [Chen und Ulsoy 2001] CHEN, L. K. ; ULSOY, A. G.: Identification of a Driver Steering Model, and Model Uncertainty, From Driving Simulator Data. In: *Department of Mechanical Engineering, Univerisity of Michigan* (2001) [35](#)
- [Dettki 2005] DETTKI, F.: *Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2005 [4](#), [30](#)
- [Deuffhard und Hohmann 2002] DEUFLHARD, P. ; HOHMANN, A.: *Numerische Mathematik I*. 3. Auflage. de Gruyter, 2002 [12](#)
- [Donges 1977] DONGES, E.: *Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt*, TH Darmstadt, Dissertation, 1977 [32](#)
- [Donges 1992] DONGES, E.: Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Massnahmen zur aktiven Sicherheit im Strassenverkehrssystem. In: *Das Mensch-Maschine-System im Verkehr. Düsseldorf* VDI-Bericht 948 (1992) [32](#)
- [Donges 2012] DONGES, E.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Kap. Fahrerhaltensmodelle, S. 15–23, Springer, 2012 (ATZ/MTZ-Fachbuch) [32](#), [33](#), [34](#), [35](#), [91](#)
- [dSpace 2012a] DSPACE: *ASM Environment Reference*, 2012 [43](#)
- [dSpace 2012b] DSPACE: *ASM Vehicle Dynamics Addendum*, 2012 [39](#)
- [dSpace 2012c] DSPACE: *ASM Vehicle Dynamics Model Description*, 2012 [39](#)
- [dSpace 2012d] DSPACE: *ASM Vehicle Dynamics Reference*, 2012 [39](#)

- [Eckstein 2001] ECKSTEIN, L.: *Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks*, Univ.Stuttgart, Dissertation, 2001 [24](#), [38](#)
- [Fahrmeir u. a. 2004] FAHRMEIR, L. ; KÜNSTLER, R. ; PIGEOT, I. ; TUTZ, G.: *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004 [64](#)
- [Fritzsche 2015] FRITZSCHE, M.: *Methoden zur Objektivierung - virtuelle Absicherung von Lenksystemen*. Kap. Track 2 - Automotive Engineering, S. 277–288, Springer Gabler, 2015 [38](#)
- [Fuhr u. a. 2003] FUHR, F. ; SCHRUELLKAMP, T. ; NEUKUM, A. ; SCHUMACHER, M.: *Integration von Fahrsimulatoren in den Entwicklungsprozess von aktiven Fahrwerksystemen / Institut für Kraftfahrwesen, Aachen; Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, Aachen; Universität Würzburg. 2003. – Forschungsbericht* [38](#)
- [Gies und Marusic 1998] GIES, S. ; MARUSIC, Z.: *Das Lenkgefühl : Merkmale der subjektiven und objektiven Beschreibung*. In: *Haus der Technik: Essen 1999* (1998) [21](#), [22](#), [33](#), [91](#)
- [Grell 2014] GRELL, D.: *Rad am Draht - Innovationslawine in der Autotechnik*. In: *ct - Magazin für Computertechnik* 03 (2014) [13](#)
- [Harrer 2007] HARRER, M.: *Characterisation of Steering Feel*, University of Bath, Dissertation, 2007 [21](#), [24](#), [26](#), [27](#)
- [Heißing und Brandl 2002] HEISSING, B. ; BRANDL, H.-J.: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Vogel, 2002 [22](#), [23](#), [27](#), [95](#)
- [Henrichfreise u. a. 2003] HENRICHFREISE, H. ; JUSSEIT, J. ; NIESSEN, H.: *Optimale Regelung einer elektromechanischen Servolenkung*. In: *VDI-Berichte, VDI-Verlag* 1753 (2003), S. 381–400 [17](#)
- [Henze 2004] HENZE, R.: *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*, TU Braunschweig, Dissertation, 2004 [28](#)
- [Hirschberg u. a. 2002] HIRSCHBERG, W. ; RILL, G. ; WEINFURTER, H.: *User-Appropriate Tyre-Modelling for Vehicle Dynamics in Standard and Limit Situations*. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 38/2 (2002), S. 103–125 [41](#)
- [Isermann und Münchhof 2011] ISERMANN, R. ; MÜNCHHOF, M. ; SPRINGER (Hrsg.): *Identification of Dynamic Systems - An Introduction with Applications*. TU Darmstadt ; TU Darmstadt ; Technische Universität Darmstadt, Institut für Automatisierungstechnik, 2011 [71](#)
- [ISO 13674-1 2010] ISO 13674-1: *Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test*. 2010 [24](#)

- [ISO 13674-2 2006] ISO 13674-2: *Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 2: Transition test*. 2006 [24](#)
- [ISO 26262-1 2011] ISO 26262-1: *Road vehicles - Functional safety - Part 1: Vocabulary*. 11 2011 [14](#), [15](#), [87](#), [89](#), [91](#)
- [ISO 26262-3 2011] ISO 26262-3: *Road vehicles - Functional safety - Part 3: Concept phase*. 11 2011 [14](#)
- [ISO 26262-4 2011] ISO 26262-4: *Road vehicles - Functional safety - Part 4: Product development at the system level*. 11 2011 [14](#)
- [ISO 3888-1 1999] ISO 3888-1: *Passenger cars — Test track for a severe lane-change manoeuvre — Part 1: Double lane-change*. 1999 [24](#)
- [ISO 4138 2012] ISO 4138: *Passenger cars – Steady-state circular driving behaviour – Open-loop test methods*. 2012 [24](#)
- [ISO 7401 2011] ISO 7401: *Road vehicles – Lateral transient response test methods – Open-loop test methods*. 2011 [24](#)
- [ISO/TR 8725 1988] ISO/TR 8725: *Road vehicles – Transient open-loop response test method with one period of sinusoidal input*. 1988 [24](#)
- [Jablonski u. a. 2008] JABLONSKI, T. ; SCHUMANN, H. ; BUSSE, C. ; HAUSMANN, H. ; HALLMANN, U. ; DREYER, D. ; SCHÖTTLER, F.: Die neue elektromechanische Lenkung APABS. In: *ATZ elektronik* 1 (2008), S. S. 30 – 35 [9](#), [91](#)
- [Koch 2010] KOCH, T.: *Untersuchungen zum Lenkgefühl von Steer-by-Wire Lenksystemen*, Technische Universität München, Dissertation, 2010 [4](#), [27](#)
- [Kondo 1953] KONDO, M.: Richtungsstabilität (wenn Steuerbewegungen hinzukommen). In: *Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE)* 7 (1953), S. 104–106 and 109 and 123 and 136–140 [32](#)
- [Krüger und Neukum 2001] KRÜGER, H.-P. ; NEUKUM, A.: Bewertung von Handlingeigenschaften - zur methodischen und inhaltlichen Kritik des korrelativen Forschungsansatzes. In: *Springer-Verlag* (2001) [53](#)
- [Lindsay und Norman 1972] LINDSAY, P. H. ; NORMAN, D. H.: Human Information Processing An Introduction to Psychology. In: *New York: Academic Press* (1972) [19](#)
- [Lunkeit 2010] LUNKEIT, D.: Control-based potentials for electric power steering systems to improve road feedback and self aligning characteristics. In: *Vortrag bei chassis.tech plus, ATZlive* (2010) [10](#), [12](#), [91](#)
- [Lunkeit 2014] LUNKEIT, D.: *Ein Beitrag zur Optimierung des Rückmelde- und Rückstellverhaltens elektromechanischer Servolenkungen*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2014 [8](#), [91](#)

- [MacAdam 2001] MACADAM, C.: Development of a driver model for near/at-limit vehicle handling / The University of Michigan Transportation Research Institute. 2001. – Forschungsbericht [36](#)
- [MacAdam 2003] MACADAM, C.: Understanding and modeling the human driver. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 40 (2003), S. 101–134 [36](#)
- [Negele 2007] NEGELE, H. J.: *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahr-simulatoren für die Fahrzeugentwicklung*, Technische Universität München, Dissertation, 2007 [37](#), [43](#)
- [Neukum und Krüger 2003] NEUKUM, A. ; KRÜGER, H. P.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen: Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien / Univ. Würzburg. 2003. – Forschungsbericht [30](#), [31](#), [51](#), [91](#)
- [Osder u. a. 1973] OSDER, S. S. ; ROUSE, W. E. ; S., Young L.: Navigation, guidance and control systems for V/STOL aircraft. In: *Sperry Technology, United States* 1/3 (1973), S. 34–41 [82](#)
- [Patil 2013] PATIL, K.: Model-Based Development of Motor Drive Controller for Hybrid Electric Vehicles. In: *dSPACE, Inc. NA* (2013) [42](#), [91](#)
- [Pfeffer und Harrer 2011] PFEFFER, P. ; HARRER, M.: *Lenkungsbandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik Von Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2011 (Atz / Mtz-Fachbuch) [1](#), [7](#), [9](#), [11](#), [16](#), [91](#)
- [Pieper 2014] PIEPER, T.: *Entwicklung eines Fahrermodells zur Querführung in kritischen Situationen*, Universität Duisburg Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, Diplomarbeit, 2014 [76](#)
- [Plöchl und Edelmann 2007] PLÖCHL, M. ; EDELMANN, J.: Driver models in automobile dynamics application. In: *Discomfort from feeling vehicle vibration* 45,7-8 (2007), S. S. 699 – 741 [37](#)
- [Rasmussen 1983] RASMUSSEN, J.: Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* IEEE, SMC-13 , Issue: 3 (1983), S. 257 – 266 [32](#)
- [Rothhämel u. a. 2011] ROTHHÄMEL, M. ; IJKEMA, J. ; DRUGGE, L.: A method to find correlations between steering feel and vehicle handling properties using a moving base driving simulator. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 49/12 (2011), S. 1837–1854 [27](#)
- [Salvucci und Gray 2004] SALVUCCI, D. D. ; GRAY, R.: A two-point visual control model of steering. In: *Perception* 33 (2004), S. 1233–1248 [29](#), [36](#), [72](#), [92](#)

- [Schimmel 2010] SCHIMMEL, C.: *Entwicklung eines fahrerbasierten Werkzeugs zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke*, TU München, Dissertation, 2010 [28](#), [82](#)
- [Schmidt 2008] SCHMIDT, G.: *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*. TU Braunschweig, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig, Dissertation, 2008 [31](#), [50](#), [65](#), [75](#)
- [Schmidt u. a. 2006] SCHMIDT, G. ; SCHOLZ, S. ; NEUKUM, A. ; KRÜGER, H. P. ; PASSEK, J. ; SCHRÜLLKAMP, T. ; WALLENTOWITZ, H.: Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen / FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik Berlin; Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg IZVW ; Institut Kraftfahrwesen Aachen (ika). 2006. – Forschungsbericht [31](#)
- [Schöttler u. a. 2012] SCHÖTTLER, F. ; SCHILLAK, C. ; DANNEHR, B. ; JABLONSKI, T.: Neuartige elektromechanische Lenkung für ein Premiumfahrzeug. In: *Automobiltechnische Zeitschrift Elektronik* 01 (2012), S. 40–45 [10](#), [91](#)
- [Sharp und Casanova 2000] SHARP, R. S. ; CASANOVA, P.: A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 33/5 (2000), S. 289–326 [43](#)
- [The MathWorks 2014] THE MATHWORKS, Inc.: *System Identification Toolbox*, 2014 [76](#)
- [Urchs 2002] URCHS, M.: *Maschine, Körper, Geist: Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft*. Klostermann, Vittorio, 2002 [18](#)
- [Wagner 2003] WAGNER, A.: *Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2003 [28](#)
- [Wang u. a. 2014] WANG, W. ; XI, J. ; CHEN, H.: Modeling and Recognizing Driver Behavior Based on Driving Data: A Survey / School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, China. 2014. – Forschungsbericht [37](#)
- [Weber 1996] WEBER, E. H. ; ROSS, H.E. (Hrsg.) ; MURRAY, D. J. (Hrsg.): *E.H. Weber on the tactile senses*. 2nd ed. Hove : Erlbaum (UK) Taylor & Francis, 1996 [19](#)
- [Willumeit und Jürgensohn 1997] WILLUMEIT, H.-P. ; JÜRGENSOHN, T.: Fahrermodelle : ein kritischer Überblick. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 7 (1997), S. 424 – 428 [32](#), [33](#), [91](#)

- [Wolf 2009] WOLF, H.: *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen*, Technische Universität München, Dissertation, 2009 [2](#), [4](#), [19](#), [20](#), [28](#), [29](#), [43](#)
- [Zschocke 2009] ZSCHOCKE, A. K.: *Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2009 [24](#), [25](#), [26](#), [95](#)